Д. Л. ГЛИЗМАНЕНКО

# ПОЛУЧЕНИЕ КИСЛОРОДА

*ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ,*
*ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ*

МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ХИМИЯ»
1972

УДК 661.937
Г 54

**Д. Л. Глизманенко.**

Г 54 Получение кислорода. Изд. 5-е. М. «Химия» 1972, 752 с., 46 табл.; 339 рис.; список литературы 15 ссылок.

В книге изложены основы производства кислорода, азота и редких газов, приведены сведения о вспомогательных материалах, описано оборудование, аппаратура и процессы получения этих газов из воздуха, рассмотрены методы контроля производства и правила техники безопасности. Даны схемы и технические характеристики новых, освоенных промышленностью в последние годы, установок для разделения воздуха

Книга предназначена для слушателей курсов повышения квалификации, а также для индивидуальной и бригадной подготовки обслуживающего персонала воздухоразделительных установок на предприятиях химической, металлургической, машиностроительной и других отраслей промышленности. Она может быть полезна для инженерно-технических работников, студентов ВТУЗов и техникумов, специализирующихся в области производства кислорода.

3-14-2
32-72

*Дмитрий Львович Глизманенко*

**Получение кислорода**

Редактор *Б. Г. Гершман*
Технический редактор *В. В. Когак*
Художник *Е. М. Бекетов*
Корректор *И. Д. Король*

Т-06491. Сдано в набор 24/I — 1972 г. Подписано в печать 28/IV 1972 г. Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Усл. печ. л. 47 (+7 вклеек) 2 усл. п. л. Уч.-изд. л. 53,77. Тираж 21 000 экз. Бум. типогр. № 3. Заказ № 56 Цена 2 р. 11 к

Издательство «Химия». Москва, К-12, Кузнецкий мост, 21/5

Типография № 11 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Москва, Шлюзовая набережная, 12.

Техническая библиотека

58805

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к пятому изданию . . . . . 8

Глава 1. **Общие сведения о кислороде** . . . . . 11

1.1. Свойства кислорода . . . . . 11
1.2. Способы получения кислорода . . . . . 13
1.3. Промышленное применение кислорода . . . . . 15
1.4. Воздух — сырье для получения кислорода . . . . . 23
1.5. Характеристика готовой продукции . . . . . 24

Глава 2. **Сжижение воздуха** . . . . . 30

2.1. Физические свойства газов и их смесей . . . . . 30
2.2. Некоторые сведения из термодинамики газов . . . . . 41
2.3. Понижение температуры газов при расширении . . . . . 48
2.4. Холодильные циклы . . . . . 58
2.4.1. Идеальный холодильный цикл . . . . . 58
2.4.2. Холодильный цикл с дросселированием воздуха . . . . . 60
2.4.3. Холодильный цикл с дросселированием и предварительным охлаждением воздуха . . . . . 68
2.4.4. Холодильные циклы с расширением воздуха в детандере и отдачей внешней работы . . . . . 72
2.5. Покрытие потерь холода в установках . . . . . 82

Глава 3. **Ректификация воздуха** . . . . . 87

3.1. Затрата энергии на разделение воздуха . . . . . 87
3.2. Жидкость и пар . . . . . 88
3.3. Ректификация воздуха . . . . . 92
3.4. Тепловой и материальный балансы . . . . . 105
3.5. Определение числа теоретических тарелок . . . . . 135

Глава 4. **Установки для разделения воздуха** . . . . . 142

4.1. Организация производства . . . . . 142
4.2. Классификация установок . . . . . 166
4.3. Установки высокого давления . . . . . 157
4.3.1. Установка АКГ-115/18 . . . . . 157

4.4. Установки высокого давления с насосом . . . 160
4.4.1. Установки К-0,04 (КГН-30) и К-0,04Т (КГН-30Т) . . . 162
4.4.2. Установка АК-0,1 (АКГН-115/18) . . . 167
4.4.3. Установка КжАж-0,04 . . . 168
4.5. Установки среднего давления . . . 172
4.5.1. Установка КГСН-150 . . . 173
4.5.2. Установка К-0,15 . . . 174
4.5.3. Установка К-0,4 . . . 176
4.6. Установки двух давлений . . . 177
4.6.1. Установка КГ-300М . . . 178
4.6.2. Установки КГ-1000 и КГ-1000М . . . 183
4.7. Установки низкого давления . . . 186
4.7.1. Особенности установок низкого давления . . . 186
4.7.2. Установка БР-1 (Кт-12) . . . 192
4.7.3. Установка Кт-12-2 . . . 199
4.7.4. Установка КтА-12-2 . . . 201
4.7.5. Установка КтК-12-1 . . . 201
4.7.6. Установка К-11-1 . . . 203
4.7.7. Установка КтКАр-12 (БР-1КАр) . . . 205
4.7.8. Установка Кт-5-2 . . . 205
4.7.9. Установка К-1,4 (БР-14) . . . 207
4.7.10. Установка АКт-16-2 . . . 209
4.7.11. Установка АКт-17-1 . . . 213
4.7.12. Установка КА-5 . . . 217
4.7.13. Установка КтК-35-2 . . . 217
4.7.14. Установка КАр-30 . . . 219
4.8. Установки для получения жидкого кислорода и жидкого азота . . . 220
4.8.1. Установки высокого давления . . . 221
4.8.1.1. Установки КЖ-150 и КжАж-0,15-1 . . . 223
4.8.1.2. Установка Кж-1,6 (КЖ-1) . . . 227
4.8.1.3. Модификация установок типа КЖ-1 . . . 229
4.8.2. Установки низкого давления . . . 232
4.8.3. Установка низкого давления с циркуляционным азотным циклом . . . 244
4.9. Воздухоразделительные установки зарубежных фирм . . . 252
4.10. Установки для получения редких газов . . . 253
4.10.1. Получение аргона . . . 263
4.10.2. Получение криптона и ксенона . . . 263
4.10.3. Получение неоно-гелиевой смеси . . . 270

Глава 5. Машины для сжатия воздуха . . . 270
5.1. Поршневые компрессоры . . . 277
5.2. Основные части поршневых компрессоров . . . 298
5.3. Эксплуатация поршневых компрессоров . . . 298
5.3.1. Смазка компрессоров . . . 303
5.3.2. Обслуживание компрессоров . . . 312
5.3.3. Ремонт компрессоров . . . 323
5.4. Центробежные компрессоры (турбокомпрессоры) . . . 333
5.4.1. Обслуживание турбокомпрессоров . . . 337

Глава 6. Машины для расширения воздуха (детандеры) . . . 337
6.1. Поршневые детандеры . . . 337
6.1.1. Классификация поршневых детандеров . . . 338
6.1.2. Рабочий процесс поршневого детандера . . . 344
6.1.3. Конструкции поршневых детандеров . . . 362
6.1.4. Обслуживание и ремонт поршневых детандеров . . . 369
6.2. Турбодетандеры . . . 370
6.2.1. Активные турбодетандеры . . . 372
6.2.2. Активно-реактивные турбодетандеры . . . 376
6.2.3. Регулирование холодопроизводительности турбодетандеров . . . 378
6.3. Эксплуатация турбодетандеров . . . 383

Глава 7. Очистка и осушка воздуха и кислорода . . . 383
7.1. Очистка воздуха от пыли . . . 387
7.2. Очистка воздуха от двуокиси углерода . . . 388
7.2.1. Химический способ . . . 397
7.2.2. Физические способы . . . 404
7.3. Осушка воздуха . . . 406
7.3.1. Адсорбционная осушка . . . 409
7.3.2. Конструкция блоков осушки . . . 417
7.3.3. Осушка вымораживанием . . . 418
7.4. Комплексная очистка воздуха цеолитами . . . 424
7.5. Осушка кислорода . . . 424
7.6. Эксплуатация аппаратуры для осушки . . . 427

Глава 8. Аппаратура блоков разделения воздуха . . . 427
8.1. Теплообменники . . . 437
8.2. Регенераторы . . . 457
8.3. Конденсаторы . . . 464
8.4. Ректификационные колонны . . . 474
8.5. Адсорберы ацетилена . . . 478
8.6. Фильтры двуокиси углерода . . . 480
8.7. Изоляция блоков разделения воздуха . . . 484

Глава 9. Трубопроводы и арматура кислородных установок . . . 484
9.1. Трубопроводы . . . 493
9.2. Арматура . . . 503
9.3. Ремонт трубопроводов и арматуры . . . 506

Глава 10. Хранение и сжатие кислорода . . . 506
10.1. Газгольдеры . . . 508
10.2. Сосуды для сжиженных газов . . . 521
10.3. Поршневые компрессоры для сжатия кислорода . . . 540
10.4. Насосы для сжиженных газов . . . 556
10.5. Устройства для газификации жидкого кислорода . . . 566

Глава 11. Наполнение баллонов . . . 566
11.1 Баллоны для сжатых газов . . . 569
11.2. Наполнительные рампы . . . 572
11.3. Хранение и испытание баллонов . . . 577
11.4. Обслуживание наполнительных рамп . . . 578
11.5. Механизация на складах баллонов . . . 578

Глава 12. Технологический процесс получения кислорода . . . . . 583

12.1. Получение газообразного кислорода на установках высокого давления . . . . . 585
12.1.1. Подготовка к пуску воздухоразделительного аппарата . 585
12.1.2. Пуск воздухоразделительного аппарата . . . . . 585
12.1.3. Установление нормального режима работы . . . . . 588
12.1.4. Регулирование процесса ректификации и теплового режима аппарата . . . . . 589
12.1.5. Отогрев и продувка воздухоразделительного аппарата . . 593
12.1.6. Остановка воздухоразделительного аппарата . . . . . 598
12.1.7. Заливание жидкости в колонных . . . . . 599
12.1.8. Проверка герметичности воздухоразделительного аппарата . . . . . 600
12.2. Получение жидкого кислорода и жидкого азота на установках высокого давления . . . . . 601
12.3. Получение кислорода на установках среднего давления . . . 606
12.4. Получение кислорода на установках с кислородным насосом 609
12.5. Получение кислорода на установках с циклом двух давлений, поршневым детандером и регенераторами . . . . . 610
12.6. Получение кислорода на установках низкого давления . . . 615
12.6.1. Особенности пуска и регулирования установок низкого давления . . . . . 615
12.6.2. Пуск основного блока БР-1 . . . . . 617
12.6.3. Пуск блока криптона и технического кислорода БР-1 . . 622
12.6.4. Ускоренный пуск блоков низкого давления . . . . . 624
12.6.5. Отогрев установок низкого давления . . . . . 626
12.7. Работа кислородо-аргонных аппаратов . . . . . 631

Глава 13. Контроль и автоматизация производства . . . . . 635

13.1. Определение количества газа . . . . . 636
13.2. Измерение давления . . . . . 639
13.3. Измерение температуры . . . . . 641
13.4. Контроль уровня жидкости . . . . . 647
13.5. Анализ газов . . . . . 650
13.6. Определение вязкостей кислорода и воздуха . . . . . 661
13.7. Контроль состава редких газов . . . . . 665
13.8. Определение степени использования раствора едкого натра . 670
13.9. Контроль жидкого кислорода на содержание углеводородов и других примесей . . . . . 671
13.9.1. Определение ацетилена и других углеводородов . . . . 671
13.9.2. Определение масла, механических примесей и влаги . . 677
13.9.3. Определение сероуглерода . . . . . 678
13.10. Контроль содержания углеводородов в криптоновом концентрате . . . . . 679
13.11. Контроль баллонов на складе . . . . . 680
13.12. Автоматизация производства кислорода . . . . . 681
13.12.1. Автоматизация блоков разделения . . . . . 681
13.12.2. Автоматизация воздушных турбокомпрессоров . . . . 687
13.12.3. Автоматизация кислородных турбокомпрессоров . . . . 688
13.12.4. Автоматизация турбодетандеров . . . . . 689
13.12.5. Автоматизация прочего оборудования воздухоразделительных цехов . . . . . 690
13.12.6. Комплексная автоматизация . . . . . 690



Глава 14. Техника безопасности при производстве кислорода . . . . 693

14.1. Причины взрывов . . . . . 693
14.2. Взрывоопасные примеси воздуха . . . . . 695
14.3. Способы очистки воздуха от ацетилена . . . . . 698
14.4. Основные мероприятия по защите установок от взрывов . . 702
14.5. Способы предотвращения загрязнения воздуха маслом . . . 713
14.6. Обезжиривание воздухоразделительных аппаратов . . . . 720
14.7. Предупреждение загорания в кислородных турбокомпрессорах . . . . . 725
14.8. Прочие источники опасностей в производстве кислорода . . 725
14.9. Способы уменьшения шума . . . . . 726
14.10. Средства и способы индивидуальной защиты . . . . . 727
14.11. Безопасная эксплуатация оборудования и предотвращение аварий . . . . . 729
14.12. Противопожарные мероприятия . . . . . 736

О международной системе единиц СИ . . . . . 738

Литература . . . . . 740

Предметный указатель . . . . . 741

*Приложение.* Диаграммы и схемы (вкладка в конце книги).

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЯТОМУ ИЗДАНИЮ

Производство кислорода в СССР развивается высокими темпами, опережающими темпы развития ведущих отраслей промышленности — металлургической, химической, машиностроительной и др.

В 1961 г. выпуск кислорода в капиталистических странах составлял 11,5 млрд. $м^3$, а в 1970 — 53 млрд. $м^3$ в год, т. е. выработка кислорода увеличилась в 4,6 раза. За этот же период производство кислорода в СССР возросло в 5 раз.

Столь быстрый рост промышленного производства кислорода обусловлен тем, что кислород широко используется в самых различных отраслях народного хозяйства для интенсификации технологических процессов, сварки и резки металлов и т. п. Применение кислорода способствует прогрессу во многих областях техники, повышению производительности труда в промышленности, увеличению выработки продукции, улучшению ее качества и снижению себестоимости.

В нашей стране большое количество домен, мартеновских печей и конверторов переведено на работу с применением кислорода, что позволяет получать дополнительно десятки миллионов тонн чугуна и стали. Значительные количества кислорода и азота расходуются также в химической промышленности для производства удобрений и органических продуктов из новых источников сырья — природных и нефтяных газов.

Директивами XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг. намечено дальнейшее ускоренное развитие химической промышленности. Предусматривается широкое внедрение прогрессивных технологических



процессов, ускорение разработки и промышленного внедрения новых процессов химической технологии.

Выполнение этих задач потребует дальнейшего расширения производства и применения кислорода, азота и редких газов в народном хозяйстве, повышения технического уровня их производства, подготовки квалифицированных кадров для эксплуатации воздухоразделительных установок. Ежегодно у нас в стране вводятся в действие новые предприятия, на которых получение кислорода, азота и редких газов из воздуха является важным звеном общего технологического процесса.

Кислородная промышленность в СССР прошла большой и сложный путь становления и развития за истекшие годы вместе со всем социалистическим народным хозяйством. Особенно интенсивно производство кислорода в нашей стране начало развиваться после Великой Отечественной войны. Были созданы научно-исследовательские и проектные институты кислородной промышленности, заводы по изготовлению воздухоразделительных установок, построены мощные кислородные станции на крупнейших металлургических и химических комбинатах, машиностроительных предприятиях; введены в строй районные заводы для производства товарного газообразного и жидкого кислорода, азота, аргона; освоено серийное производство новых мощных установок для получения технологического и технического кислорода, чистого азота и редких газов. В эксплуатации находятся воздухоразделительные агрегаты производительностью 35 000 $м^3/ч$ кислорода и создаются еще более крупные агрегаты. Выпускаются мощные кислородные турбокомпрессоры (давление до 35 $кгс/см^2$), турбодетандеры, поршневые кислородные насосы (давление до 420 $кгс/см^2$), а также ряд других машин и аппаратов для низкотемпературных процессов сжижения газов и разделения воздуха.

По техническому уровню развития производства кислорода, азота и редких газов, а также кислородному и криогенному машиностроению Советский Союз занимает одно из ведущих мест среди наиболее технически развитых стран. В нашей стране созданы и успешно работают кислородные станции, по своей мощности являющиеся самыми крупными в Европе и уникальными в мировой технике.

Непрерывное развитие процессов глубокого охлаждения и разделения воздуха требует систематической подготовки кадров и повышения их квалификации. Обслуживающий персонал воздухо-

разделительных установок должен поддерживать нор[illegible]ый технологический режим, делать замеры и производи[illegible]нализы, необходимые по ходу технологического процесса, [illegible]ять текущий ремонт оборудования, а также предупреждать [illegible]кность возникновения неполадок и аварий. Кроме того, он до[illegible]знать технико-экономические показатели работы воздухора[illegible]льных установок и причины, приводящие к их улучшению или [illegible]нию, для того чтобы добиваться максимальной производительн[illegible] оборудования при наименьшем расходе электроэнергии. Эти [illegible]просам и посвящена настоящая книга.

Автор старался изложить материал книги в наиболе[illegible]упной для читателя форме и в то же время в достаточно [illegible]ом объеме, необходимом для практики данного производства. [illegible]тое издание книги переработано и дополнено описанием новых [illegible]дов оборудования для разделения воздуха, его особенностей и методов обслуживания. Особое внимание уделяется вопросам техники безопасности процессов, связанных с разделением воздуха глубоким охлаждением.

Учитывая практику эксплуатации установок и в целях облегчения перехода к системе СИ (ГОСТ 9867—61) в книге приведены в качестве единиц: давления — *кгс/см*², количества теплоты — *ккал*, электроэнергии — *квт·ч* и значения этих величин в единицах СИ: давления — *н/м*² и *Мн/м*² (ньютон и меганьютон на квадратный метр); работы, энергии и количества теплоты— *дж* (джоуль).

Автор выражает глубокую благодарность всем организациям и лицам, оказавшим ему содействие и помощь в подборе материалов для пятого издания и высказавшим свои замечания по четвертому изданию книги.

ГЛАВА 1

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КИСЛОРОДЕ

## 1.1. СВОЙСТВА КИСЛОРОДА

Кислород — наиболее распространенный в природе химический элемент. В виде различных соединений он содержится в земной коре (47,2 вес. %) и морской воде (85,82 вес. %). В химически не связанном состоянии кислород находится только в атмосферном воздухе (23,15 вес. % или 20,93 объемн. %).

Кислород входит в состав большинства органических веществ живых организмов — белков, жиров и углеводов.

При участии кислорода совершается один из важнейших жизненных процессов — дыхание. Взаимодействуя с питательными веществами клеток, кислород обеспечивает организму необходимую для жизни энергию. Под действием солнечного света растения поглощают из атмосферы двуокись углерода $CO_2$ и выделяют свободный кислород. Кислород может выделяться также при фотохимическом разложении водяных паров в верхних слоях атмосферы под действием ультрафиолетовой части солнечных лучей. В результате этих процессов содержание кислорода в атмосферном воздухе сохраняется постоянным.

Кислород обладает высокой химической активностью и образует соединения со всеми химическими элементами, кроме редких газов (аргона, криптона, ксенона, неона и гелия).

Реакция соединения вещества с кислородом называется *окислением*. С большинством элементов кислород соединяется без нагревания, т. е. без подвода энергии извне. Резкое увеличение скорости реакций окисления достигается повышением температуры или применением катализаторов*.

Соединение кислорода с другими элементами сопровождается выделением тепла, а иногда и света (например, при горении).

Горение различных веществ в чистом кислороде протекает быстрее, чем в воздухе, и характеризуется высокой концентрацией выделяющейся теплоты. Это объясняется тем, что в данном случае

* Катализаторами называются вещества, обладающие свойством повышать скорость реакции и при этом сами не претерпевающие химических изменений.

теплота не затрачивается на нагревание содержащегося в воздухе азота, не участвующего в реакции окисления.

Горючие газы (водород, ацетилен, метан и др.) образуют с кислородом сильно взрывчатые смеси. Смазочные масла и также их пары и продукты разложения способны окисляться при соприкосновении с чистым кислородом, а при определенных условиях и самовоспламеняться со взрывом. При повышении давления и температуры опасность самовоспламенения и взрыва смесей горючих веществ с кислородом возрастает.

Воспламенение в замкнутом пространстве пористых горючих веществ (угольной пыли и мелочи, прессованного торфа, шерсти и т. п.), пропитанных жидким кислородом, сопровождается взрывом большой разрушительной силы. Такие вещества называются *оксиликвитами* и находят применение при горновзрывных работах. Сжигание распыленного жидкого топлива в смеси с кислородом используется в ракетных двигателях и в установках для огневого бурения твердых пород.

Атомный вес кислорода равен 16. Молекула кислорода при нормальной температуре и давлении содержит два атома и обозначается символом $O_2$. Атомы кислорода связаны в молекуле весьма прочно, и только при температуре около 1500 °С начинается заметное распадение молекулы $O_2$ на атомы (диссоциация); полностью это происходит при температуре около 5000 °С. При окислении, протекающем при более низких температурах, кислород вступает в реакцию с другими элементами в молекулярном состоянии.

Ядро атома кислорода состоит из 8 протонов и 8 нейтронов. Вокруг ядра расположена электронная оболочка с 2 внутренними и 6 внешними электронами.

В чистом виде кислород был выделен Шееле в 1772 г. (Швеция) и независимо от него Пристли в 1774 г. (Англия). Лавуазье (Франция) определил состав воздуха и установил, что кислород энергично поддерживает горение, а при вдыхании поддерживает жизнь и что основой этих процессов является реакция окисления веществ. Ошибочно полагая, что кислород входит в состав всех кислот, Лавуазье назвал новый газ кислородом — oxygenium (от греческого слова oxys — кислый и genos — рождение).

Кислород при обычной температуре и атмосферном давлении является бесцветным газом, не имеющим запаха, вкуса и несколько более тяжелым, чем воздух — относительная (к воздуху) плотность кислорода $d=1{,}1$.

Масса 1 *м*³ кислорода при 0 °С (273 °К) и 760 *мм рт. ст.* равна 1,43 *кг*, при 20 °С (293 °К) и том же давлении она составляет 1,33 *кг*.

При охлаждении кислорода под атмосферным давлением до температуры — 183 °С (точнее — 182,97 °С) он превращается в прозрачную голубоватую жидкость, легкоподвижную и быстро испаряющуюся при комнатной температуре. При дальнейшем охлаждении до —218,7 °С жидкий кислород переходит в твердое состояние — голубые кристаллы плотностью 1,46 *г/см*³.



При испарении 1 *кг* жидкого кислорода образуется 750 *дм*³ (0,75 *м*³) газа, отнесенного к стандартным условиям (20 °С и 760 *мм рт. ст.*) При испарении 1 *дм*³ (1,132 *кг*) жидкого кислорода образуется 850 *дм*³ (0,85 *м*³) газа при стандартных условиях.

Жидкий кислород, подвергнутый продолжительному воздействию тихого электрического разряда, частично переходит в новое химическое соединение — жидкий озон $O_3$ — темно-голубую легко взрывающуюся жидкость.

Газообразный кислород, так же как и азот, способен растворяться в воде. Растворимость кислорода в воде незначительна и составляет 0,031 *см*³ в 1 *см*³ воды при 20 °С и атмосферном давлении; при 0 °С растворимость увеличивается до 0,049 *см*³ в 1 *см*³.

Кислород в газообразном, жидком и твердом состоянии обладает магнитной восприимчивостью, т. е. его частицы под действием магнита способны намагничиваться и притягиваться к магнитным полюсам.

## 1.2. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ КИСЛОРОДА

В начале текущего века, когда были разработаны первые промышленные методы получения кислорода, его производили в сравнительно небольших количествах. Поэтому кислород обходился довольно дорого и находил ограниченное применение. За последние 25—30 лет технология и аппаратура производства кислорода были настолько усовершенствованы, что сейчас можно вырабатывать дешевый кислород в очень больших количествах и широко использовать его в промышленности.

Кислород можно получать: 1) химическими способами; 2) электролизом воды и 3) разделением воздуха методом глубокого охлаждения.

**Химические способы.** Первоначально применялись только способы, основанные на свойствах некоторых веществ (например, бертолетовой соли, перекиси бария и др.) в определенных условиях выделять $O_2$. При нагревании 1 *кг* бертолетовой соли $KClO_3$ выделяется 270 *дм*³ кислорода.

Окись бария BaO при нагревании до 540 °С (или до 650 °С под давлением) поглощает кислород из атмосферного воздуха, образуя перекись бария $BaO_2$. При дальнейшем нагревании до 870 °С (или до 650 °С при пониженном давлении) перекись бария разлагается, переходя снова в окись бария, и выделяет поглощенный кислород по реакции

$$2BaO_2 \rightleftarrows 2BaO + O_2$$

Используя окись бария, можно получать из воздуха около 70 *дм*³ кислорода на 1 *кг* BaO. Этот способ, предложенный братьями Брин в 1880 г., явился первым промышленным методом получения

кислорода, используя который на заводе «Бритиш Оксиджен Компани» (Англия) в 1907 г. было выработано 280 тыс. $м^3$ технического кислорода. Однако в последующие годы он был вытеснен другими способами: сначала электролизом воды, а затем — низкотемпературной ректификацией воздуха.

Кислород можно получить, пропуская двуокись углерода через свинцовокислый кальций $Ca_2PbO_4$ при 700 °С; разложением марганцовистокислого натрия $Na_2MnO_4$ водяным паром при 450 °С; воздействием серной кислоты $H_2SO_4$ на бихромат калия $K_2Cr_2O_7$.

Перекись натрия $Na_2O_2$ или перекись калия $K_2O_2$, а также надперекись натрия $Na_2O_4$ выделяют кислород при взаимодействии с парами воды и двуокисью углерода. Из 1 *кг* перекиси калия получается 90—100 *дм*³, из 1 *кг* перекиси натрия — до 140 *дм*³ кислорода.

В зарубежной патентной литературе* описаны способы получения кислорода из воздуха попеременным окислением и восстановлением окислов хрома, нанесенных на силикагель по реакции

$$6CrO_3 \rightleftarrows 2Cr_2O_3 \cdot CrO_3 + 3O_2$$

В зоне окисления температура равна 400 °С, а в зоне восстановления высших окислов хрома и выделения кислорода — выше 250 °С.

Салькомин — искусственно приготовляемое зернистое вещество, сходное по составу с гемоглобином крови, способно поглощать из воздуха кислород и отдавать его обратно при изменении давления и температуры. При поглощении кислорода выделяется тепло в количестве 19—20 *ккал/моль*, а при отдаче кислорода теплота поглощается. Салькомин поглощает кислород при избыточном давлении 6,6—7,7 *кгс/см*² и 35 °С в количестве до 4% от массы поглотителя, а выделяет кислород при понижении избыточного давления до 1 *кгс/см*² и нагревании до 95 °С.

В настоящее время химические способы получения кислорода не имеют промышленного значения, так как они малопроизводительны. Их иногда применяют для получения небольших количеств кислорода в лабораторной практике и других случаях.

**Электролиз воды.** При пропускании постоянного электрического тока через воду $H_2O$, в которую для повышения электропроводности добавлена гидроокись натрия NaOH (едкий натр), вода разлагается на кислород и водород. Кислород собирается у положительного полюса, водород — у отрицательного. На 1 *м*³ кислорода получается 2 *м*³ водорода. Аппараты для получения кислорода и водорода электролизом называются *электролизерами*. Процесс электролиза требует много электроэнергии — на 1 *м*³ кислорода и 2 *м*³ водорода затрачивается 12—15 *квт·ч* ($43{,}2 \cdot 10^6$—$54{,}0 \cdot 10^6$ *дж*). Поэтому данный процесс экономически целесообразен только при очень низкой стоимости электроэнергии (например, энергии гидростанций) и главным образом используется для получения чистого водорода, а кислород является побочным продуктом.

* Пат. США 27831334.



**Разделение воздуха методом глубокого охлаждения.** Атмосферный воздух представляет смесь азота, кислорода, аргона и редких газов, не связанных между собой химически. Приближенно воздух можно рассматривать как смесь только азота и кислорода, поскольку аргона и редких газов в нем содержится менее 1% (точный состав атмосферного воздуха см. ниже); в этом случае округленно принимают, что воздух содержит 79% азота и 21% кислорода по объему.

Разделение воздуха является достаточно сложной технической задачей, особенно если он находится в газообразном состоянии. Этот процесс облегчается, если предварительно перевести воздух в жидкое состояние сжатием, расширением и охлаждением, а затем осуществить его разделение на составные части, используя разность температур кипения кислорода и азота. Под атмосферным давлением жидкий азот кипит при —195,8 °С, жидкий кислород при —182,97 °С. Если жидкий воздух постепенно испарять, то сначала будет испаряться преимущественно азот, обладающий более низкой температурой кипения; по мере улетучивания азота жидкость будет обогащаться кислородом. Повторяя процесс испарения и конденсации многократно, можно достичь желаемой степени разделения воздуха на азот и кислород требуемых концентраций. Такой процесс многократного испарения и конденсации жидкости и ее паров для разделения их на составные части называется *ректификацией*. Поскольку данный способ основан на охлаждении воздуха до очень низких температур, он называется способом *глубокого охлаждения*. Получение кислорода из воздуха глубоким охлаждением — наиболее экономично, вследствие чего этот метод нашел широкое применение в промышленности. Глубоким охлаждением и ректификацией воздуха можно получать практически любые количества дешевого кислорода или азота. Расход энергии на производство 1 *м*³ кислорода составляет от 0,4 до 1,6 *квт·ч* ($1{,}44 \cdot 10^6$—$5{,}76 \cdot 10^6$ *дж*) в зависимости от производительности и технологической схемы установки.

## 1.3. ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КИСЛОРОДА

Возможность использования кислорода для интенсификации технологических процессов давно привлекала внимание исследователей. Еще в 1903 г. Д. И. Менделеев высказал мысль об использовании кислорода в промышленности «для интенсификации процессов горения и металлургических». Рассмотрим кратко области применения кислорода в народном хозяйстве.

**Химическая промышленность.** На химических предприятиях потребляют большие количества кислорода, который получают из атмосферного воздуха одновременно с производством чистого азота, необходимого для производства синтетического аммиака и азот-

ной кислоты. На некоторых заводах используют кислород, получаемый в качестве побочного продукта при производстве водорода электролизом воды.

Развитие химической промышленности в СССР базируется на широком использовании в качестве основного сырья природного газа, попутных нефтяных газов и газов нефтепереработки. Благодаря этому удалось достичь резкого увеличения выпуска азотных удобрений, химических волокон, пластмасс и других синтетических материалов. Для производства ряда важных химических продуктов требуются большие количества кислорода и азота, как это видно из следующих данных:

| | Расход, $м^3/т$ кислорода | Расход, $м^3/т$ азота | | Расход, $м^3/т$ кислорода | Расход, $м^3/т$ азота |
|---|---|---|---|---|---|
| Серная кислота | 240 | — | Этилен и пропилен | — | 40 |
| Аммиак | 500 | 200 | Полиформальдегид | — | 150 |
| Метанол | 600 | 280 | Полиэтилен | — | 430 |
| Ацетилен | 3600 | — | | | |

По масштабам применения технологического кислорода и азота химическая промышленность занимает второе место после металлургии. Потребность в технологическом кислороде современного крупного химического комбината составляет 60—100 тыс. $м^3/ч$. Использование кислорода в химии открывает дополнительные возможности интенсификации процессов, создания более компактных, высокопроизводительных агрегатов и автоматизации производства. Ниже дается краткое описание некоторых процессов, требующих для своего осуществления значительных количеств кислорода.

Газификация твердых топлив в кипящем слое. Способ непрерывной газификации в кипящем слое пригоден для низкосортных топлив — бурых углей, лигнитов и торфа. Мелкозернистое топливо находится в шахте газогенератора в непрерывном движении и взвешенном состоянии, образуя *кипящий слой*. Топливо загружается сверху, а дутье подается снизу. Используя паровоздушное дутье (58% пара, 19% азота и 23% кислорода), вырабатывают *полуводяной газ* (30—33% водорода, 33—34% окиси углерода, остальное — азот и двуокись углерода), потребляемый как сырье для производства синтетического аммиака. При парокислородном дутье (30—35% кислорода, остальное — водяной пар) образуется *водяной газ* (40—41% водорода, 28—36% окиси углерода, остальное — азот и двуокись углерода), используемый для синтеза спиртов и производства водорода. Расход кислорода на 100 $м^3$ смеси $CO+H_2$ составляет: 285 $м^3$ для полуводяного и 350 $м^3$ для водяного газа.

Каталитическая конверсия* природного газа (метана). Этот процесс сейчас широко применяется при получении исходной азото-водородной смеси для производства синтетического аммиака и смеси водород — окись углерода, используемой для синтеза метанола, высших спиртов и альдегидов. Конверсия метана вытеснила процессы газификации кокса на химических заводах. Выработка аммиака из природного газа экономически выгодна, так как при этом снижаются капитальные затраты (на 20%) и себестоимость (на 49%) по сравнению с таковыми при потреблении кокса.

Применяется одноступенчатая и двухступенчатая каталитическая конверсия метана. Для ускорения процесса используют никелевый катализатор. Конверсия метана протекает по схеме:

$$CH_4 + 0{,}5O_2 \longrightarrow CO + 2H_2 + 8{,}5 \text{ ккал}$$

$$CH_4 + H_2O \rightleftarrows CO + 3H_2 - 49{,}3 \text{ ккал}$$

$$CH_4 + CO_2 \rightleftarrows 2CO + 2H_2 - 59{,}1 \text{ ккал}$$

$$CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2 + 9{,}8 \text{ ккал}$$

При использовании обогащенного воздуха, содержащего 36—40% $O_2$, получается газ следующего состава:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Водород | 50—54 | Двуокись углерода | 7—7,5 |
| Азот | 22—25 | Метан | До 0,5 |
| Окись углерода | 17—18 | Аргон | До 0,35 |

После очистки от $CO_2$ и CO количество водорода в газе достигает 66—71% и он потребляется для приготовления азото-водородной смеси (75% $H_2$ и 25% $N_2$) при синтезе аммиака. При синтезе метанола и высших спиртов требуется более высокое содержание CO в конвертированном газе, что зависит от содержания $CO_2$ в исходном газе.

При конверсии природного газа с применением технологического кислорода (98% $O_2$) конвертированный газ имеет следующий состав: 72% $H_2$, 23% $CO_2$, 4% CO, остальное $CH_4$, $N_2$ и Ar. На получение 1000 $м^3$ $CO+H_2$ при работе на обогащенном воздухе расходуется 125 $м^3$ кислорода, а при конверсии с технологическим кислородом — 205 $м^3$.

Высокотемпературная конверсия метана. Реакция частичного окисления метана без катализатора протекает при 1400—1500 °C по схеме:

$$CH_4 + O_2 \longrightarrow CO + H_2 + H_2O + 66{,}4 \text{ ккал}$$

Получаемый газ содержит 34,7% CO и 62,0% $H_2$. Одним из преимуществ высокотемпературной конверсии является высокая скорость реакции, что уменьшает размеры аппаратуры. Однако при этом способе на единицу продукта расходуется на 10—12% больше природного газа, чем при каталитической конверсии. Соответственно повышается удельный расход кислорода (на 25% при работе на кислороде и на 60% при использовании обогащен-

* Конверсия газов — процесс переработки газовой смеси для изменения ее первоначального состава.

ного воздуха). Образующийся в значительном количестве пар может быть применен в производстве.

Благодаря ряду преимуществ, особенно при переработке природного газа под давлением 10—30 *кгс/см*², высокотемпературная конверсия применяется наряду с каталитической.

Низкотемпературное окисление углеводородов попутных нефтяных газов. Попутные нефтяные газы служат сырьем для производства спиртов и альдегидов методом низкотемпературного окисления кислородом этана и пропана, содержащихся в попутных газах. Остаточные газы процесса используются для синтеза аммиака. Попутный нефтяной газ (60% $CH_4$, 18% $C_2H_6$, 10% $C_3H_8$ и 12% $N_2$) окисляют кислородом в реакторе при 50 *кгс/см*² и 340—360 °С. Таким способом получают метанол, ацетальдегид и формальдегид, а также небольшие количества этилового спирта, ацетона и др. Эти продукты извлекают из газовой смеси, а остаток ее направляют на смешение со свежим газом и кислородом для последующего окисления в процессе высокотемпературной конверсии под давлением 30 *кгс/см*²; получаемый газ используют для синтеза аммиака.

На 1 *т* органических продуктов (52% метанола, 18% ацетальдегида, 30% формальдегида) расходуется 628 *м*³ кислорода и 3800 *м*³ попутного нефтяного газа. При этом получают дополнительно 4,5 *т* синтетического аммиака. По сравнению с другими методами описанный способ снижает себестоимость продукции на 25% и капиталовложения — на 20%.

Получение ацетилена из природного газа. Ацетилен $C_2H_2$ используют для синтеза важнейших химических продуктов: ацетальдегида, уксусной кислоты, этилового спирта, винилацетата, трихлорэтилена, акрилонитрила и др. В последнее время ацетилен получают не только энергоемким карбидным способом, но также окислительным пиролизом метана в смеси с кислородом при 1300—1500 °С по реакции:

$$6CH_4 + 4O_2 = C_2H_2 + 8H_2 + 3CO + CO_2 + 3H_2O$$

Исходная смесь, содержащая 60—64% метана и 40—36% кислорода, перед реактором подогревается до 500—700 °С. В зависимости от температуры в реакторе степень превращения метана в ацетилен составляет 27—31%. Ацетилен, полученный этим способом, называется *пиролизным* (в отличие от *карбидного*). На производство 1 *т* пиролизного ацетилена расходуется в среднем 3600 *м*³ кислорода, 6400 *м*³ природного газа и 5,7 *т* пара. При этом дополнительно образуется 11 100 *м*³ синтез-газа (содержит $H_2$ и CO), используемого для переработки в аммиак, метиловый, изобутиловый спирты и др.; из указанного количества синтез-газа можно получить 4 *т* аммиака. Себестоимость пиролизного ацетилена на 30—40% меньше карбидного.

Производство азотной кислоты. Кислород применяют в производстве разбавленной (57—60%-ной) и крепкой



(98% моногидрата) азотной кислоты. Кислоту получают непосредственно из окислов азота так называемым прямым синтезом. Для выработки разбавленной азотной кислоты используется кислород, являющийся побочным продуктом азотных воздухоразделительных установок. Кислород интенсифицирует процесс конверсии аммиака и переработки нитрозных газов в кислоту. Крепкую азотную кислоту получают в автоклаве под давлением 50 *кгс/см*². На 1 *т* крепкой азотной кислоты расходуется около 150 *м*³ кислорода.

**Черная металлургия.** По количеству потребляемого кислорода эта отрасль промышленности занимает первое место. Кислород применяют в процессах получения чугуна и стали, а также для зачистки и резки металла в прокатном производстве и резки горячих слитков в установках непрерывной разливки стали. Потребность в кислороде современного крупного металлургического комбината достигает 150—250 тыс. *м*³/*ч*.

В доменных печах при выплавке чугуна кислородом обогащают воздух, вдуваемый в печь для сжигания загруженного кокса и подаваемого природного газа. При сравнительно небольшом обогащении дутья кислородом (до 25—28%) удается на 15—20% увеличить производительность доменной печи при выплавке доменных ферросплавов (ферросилиция и ферромарганца), применять более бедные руды и снизить расход топлива при выплавке чугуна. Для доменной печи требуются очень большие количества кислорода — 50—100 тыс. *м*³/*ч* и более.

Особенно эффективно использование кислорода в сочетании с природным газом в доменном производстве. В этом случае при содержании кислорода в дутье 30—35% производительность печи возрастает на 30%, удельный расход кокса снижается на 25—40%. С применением кислорода работают современные домны-гиганты объемом 2700—3000 *м*³. Строятся доменные печи объемом 5000 *м*³.

В мартеновских печах кислород применяют для обогащения воздуха, подаваемого в форсунки печи при выплавке стали, а также при продувке жидкого расплавленного металла с целью удаления из него углерода и вредных примесей. Кислород резко ускоряет процесс плавки, повышает производительность сталеплавильных печей, улучшает качество и снижает себестоимость стали, дает значительную экономию топлива.

Впервые выплавка стали в мартеновских печах с использованием кислорода была осуществлена в СССР (1932 г.). В настоящее время этот способ внедрен на большинстве мартеновских печей. Кислород также используется для продувки чугуна в ковше (миксере) перед заливкой в ванну мартеновской печи; это делается для предварительного обезуглероживания чугуна и ускорения процесса выплавки стали.

Во вращающихся цилиндрических печах (роторе) сталь выплавляют из чугуна при подаче чистого кислорода

в ванну жидкого металла и в пространство над ней. По сравнению с мартеновским роторный способ получения стали снижает ее себестоимость и позволяет получать сталь более высокого качества, с меньшим содержанием фосфора, серы, кристаллических включений и кислорода.

В кислородно-конверторном процессе выплавки стали применение кислорода особенно эффективно. Этот метод заключается в том, что жидкий чугун продувается технически чистым кислородом в *конверторе**. Кислород периодически подается в конвертор через горловину и, воздействуя на жидкий металл, окисляет углерод и примеси в металле. По сравнению с мартеновским кислородно-конверторный способ производства стали характеризуется более высокой производительностью, меньшими капитальными затратами и эксплуатационными расходами. В результате себестоимость 1 *т* стали снижается. Оборудование кислородно-конверторного цеха проще, чем мартеновского, что сокращает сроки строительства сталеплавильных цехов. Кислородно-конверторным способом выплавляют широкий ассортимент марок сталей, по качеству превышающих мартеновские. На ряде крупных металлургических заводов СССР построены мощные конверторные цехи нового типа и крупные кислородные станции для них. Емкость конверторов, работающих на кислороде, достигает 250—350 *т* жидкой стали. Данный способ впервые был разработан в СССР.

В электропечах при выплавке легированных сталей применение кислорода дает большой экономический эффект (снижается расход электроэнергии, себестоимость и т. п.).

В ближайшие годы кислород еще шире будет применяться на металлургических предприятиях; соответственно возрастет общая производительность воздухоразделительных агрегатов на этих заводах. В перспективе предусмотрено весь чугун и всю сталь в нашей стране выплавлять только с применением кислорода.

Металлургические заводы являются также крупными потребителями 99%-ного и 99,98%-ного азота, используемого соответственно для продувки межконусных пространств загрузочных устройств доменных печей и для создания защитной среды при выплавке металла.

Комплексное получение кислорода и азота — основных продуктов разделения воздуха — снижает себестоимость кислорода на металлургических заводах и еще более повышает экономическую эффективность его применения в металлургии.

**Литейное производство.** Кислород вдувается в фурмы вагранок с целью улучшения процесса горения топлива и повышения температуры чугуна. Это увеличивает производительность вагранок,

* Конвертор — металлургический агрегат, имеющий грушевидную форму и горизонтальные опоры, позволяющие наклонять конвертор относительно вертикальной плоскости. Применяется для получения стали из жидкого чугуна продувкой его воздухом или техническим кислородом.



способствует уменьшению брака литья и дает экономию топлива. При более высокой температуре разливаемого металла облегчается получение так называемого модифицированного чугуна, обладающего повышенными прочностью и сопротивлением изгибающим и ударным нагрузкам.

**Цветная металлургия.** Применение кислорода для обогащения дутья при выплавке меди, цинка, никеля, свинца и других металлов интенсифицирует эти процессы, способствует повышению производительности агрегатов, увеличению выхода цветных металлов и снижению их себестоимости; делает возможным использовать более бедные руды, переработка которых прежде считалась нерентабельной. В цветной металлургии кислород используется:

1) при шахтной плавке свинцово-цинкового агломерата*, фьюмингование** шлаков и обжиге цинковых концентратов в печах с кипящим слоем;

2) при шахтной плавке окисленных никелевых руд, сульфатхлорирующем обжиге никелевого огарка и непрерывном конвертировании никелевых штейнов***;

3) при шахтной плавке медного рудного агломерата, конвертировании медных штейнов и плавке медных концентратов во взвешенном состоянии.

Применение кислорода не только повышает технико-экономические показатели процессов выплавки цветных металлов, но и улучшает условия труда рабочих, обслуживающих плавильные агрегаты, что для цветной металлургии имеет особо важное значение, так как эти процессы связаны с выделением большого количества вредных газов и паров (окислов меди, цинка, свинца и др.).

Кислород в цветной металлургии открывает возможность комплексного извлечения и использования ценных продуктов, содержащихся в отходящих газах. Например, при работе на обогащенном кислородом дутье повышается концентрация сернистого ангидрида в отходящих газах, что делает возможным получение из этих газов дешевой серной кислоты — важнейшего продукта для производства удобрений.

За разработку и внедрение новых прогрессивных технологических процессов, резкое увеличение выплавки меди с применением кислорода и комплексное использование сырья с получением рениевой**** продукции и серной кислоты из отходящих газов конверторов большой группе специалистов цветной металлургии присвоена Государственная премия СССР за 1969 г.

**Сварка и резка.** При сварке и резке металлов применяется 98,5—99,7%-ный кислород. Для газовой сварки и других процессов

* Агломерат — обогащенная руда (свинцово-цинковая, медная и др.).

** Фьюмингование — возгонка паров цинка из шлаков.

*** Штейн — промежуточный продукт, содержащий основное количество извлеченного из руды никеля или меди.

**** Рений — серебристо-белый тугоплавкий металл, химически стойкий. Используется для антикоррозионных покрытий, в вакуумной технике и т. п.

газопламенной обработки кислород смешивают с горючим газом (ацетиленом, пропаном, природным газом и др.) с целью интенсификации процесса горения и получения пламени с высокой температурой, требующейся для быстрого нагрева и расплавления металла.

При резке кислородом стали металл нагревается по линии реза до высокой температуры газо-кислородным пламенем, затем пускается струя чистого кислорода, которая режет металл, сжигая его по узкой полосе намеченного контура резки. С помощью кислорода можно резать стальные слитки, болванки и плиты толщиной до 1200 *мм* и более.

Аргон, азот, кислородно-аргонную смесь и другие газовые смеси применяют при плазменно-дуговой резке, наплавке и сварке металлов.

**Огневое бурение твердых пород.** Бурение производится вращающейся со скоростью 10—20 *об/мин* буровой штангой с укрепленной на ее конце цилиндрической горелкой, в камере которой под избыточным давлением 5—6 *кгс/см²* сгорает керосин в смеси с газообразным кислородом. Продукты сгорания под действием внутрикамерного давления выходят в виде раскаленных струй с температурой около 3000 °С через сопла горелки со сверхзвуковой скоростью (2000 *м/сек*) и разрушают каменную породу. Диаметр скважины от 150 до 400 *мм*, давление кислорода 10 *кгс/см²*, керосина 5—6 *кгс/см²*. Горелка выполнена из меди и охлаждается водой. Огневое бурение применяют для ускорения проходки скважин в твердых скальных породах; скорость бурения этим способом примерно в семь раз выше, чем при ударно-канатном бурении.

**Прочие области применения кислорода.** Кислород используется в медицине, в кислородно-дыхательных аппаратах при высотных полетах, для спасательных работ под землей, в микробиологии, в целлюлозно-бумажной промышленности, в цементном производстве.

Кислород может применяться также при паро-кислородной газификации бурых углей в газогенераторах под давлением 30 *кгс/см²* с целью получения отопительного газа теплотворной способностью 4000—4500 *ккал/м³* *.

Большие количества жидкого кислорода расходуются в двигательных установках космических ракет. Например, потребление кислорода в 1967 г. для ракетной техники в США, по опубликованным данным, составило 1654 млн. *м³* (16,3% общего производства кислорода в США за этот год). Для космических исследований также расходуется много жидкого азота и жидкого гелия.

Перспективным потребителем кислорода является энергетика, где кислород может применяться для повышения температуры

* Вследствие широкого использования природного газа в настоящее время газификация твердых топлив для получения технологического и бытового газа применяется редко.



(2600 °С) в камерах сгорания МГД-генераторов*. Для этих установок необходимо снижение стоимости кислорода, что можно достичь при одновременном использовании азота, получаемого на данной воздухоразделительной установке.

## 1.4. ВОЗДУХ — СЫРЬЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КИСЛОРОДА

**Состав воздуха.** Атмосферный воздух является неисчерпаемым источником сырья для получения кислорода, азота и редких (инертных) газов методом глубокого охлаждения. Кроме кислорода и азота воздух содержит в небольших количествах аргон, неон, гелий, криптон, ксенон и различные примеси.

Аргон, неон, гелий криптон и ксенон называют *редкими газами*. Часто их называют *инертными газами* потому, что они не образуют соединений с другими элементами**.

Средний состав сухого атмосферного воздуха (в объемн. %)***:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Азот | 78,09 | Водород | 0,00005 |
| Кислород | 20,95 | Двуокись углерода | 0,03 |
| Аргон | 0,93 | Метан | 0,00015 |
| Неон | 0,0018 | Закись азота | 0,00005 |
| Гелий | 0,000524 | Озон | 0,00001—0,000001 |
| Криптон | 0.000114 | | |
| Ксенон | 0,0000087 | | |

Редкие газы широко применяются во многих важных производствах. Поэтому, несмотря на малое содержание их в воздухе, они попутно извлекаются при получении кислорода и азота и после очистки от примесей используются по назначению.

Гелий для промышленных целей получают обычно не из воздуха, а из природного газа некоторых месторождений, в которых содержится до 0,2—0,3, а в отдельных случаях — до 1,8—2% гелия. Поэтому получение гелия из природных газов экономически более выгодно. Только на очень крупных воздухоразделительных установках, производительностью 35 тыс. *м³/ч* кислорода целесообразно извлекать гелий из неоно-гелиевой смеси, отбор которой на такой установке может достигать 1,5—1,9 *м³/ч*.

**Примеси в воздухе.** Атмосферный воздух содержит ряд примесей, вредных для процесса глубокого охлаждения: твердые частицы (пыль, сажу и др.), пары воды, двуокись углерода, пре-

* Магнитогидродинамические (МГД) генераторы — установки для прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую.

** Термин «инертные» не совсем правилен в отношении криптона и ксенона, так как последними исследованиями показана возможность химического соединения криптона с фтором, а ксенона — с фтором, кислородом и натрием (с кислородом и натрием — через гексафторксенон — $XeF_6$).

*** Здесь и далее приводятся объемные проценты. Если указываются проценты весовые, то это оговаривается особо.

дельные и непредельные углеводороды, поступающие вместе с атмосферным воздухом или являющиеся продуктами разложения смазочных масел, сероуглерод, окислы азота. От этих примесей воздух очищают перед поступлением в воздухоразделительный аппарат.

Способы очистки атмосферного воздуха и применяемая для этого аппаратура описаны в главах 7, 8. Воздух, поступающий в воздушные фильтры компрессоров воздухоразделительных установок, должен быть возможно более чистым. Если содержание примесей в окружающем воздухе выше установленных норм, то место забора воздуха переносят в район с менее загрязненной атмосферой (см. разд. 4.1).

## 1.5. ХАРАКТЕРИСТИКА ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Готовой продукцией цеха разделения воздуха могут являться кислород, азот, аргон и редкие газы. Газообразные продукты подаются потребителям по газопроводам под требуемым давлением или доставляются в баллонах или реципиентах под высоким давлением, предусмотренным ГОСТ и ТУ на данную продукцию. Сжиженные газы поставляются в сосудах Дьюара, резервуарах и цистернах различной емкости под давлением, близком к атмосферному.

Краткие технические характеристики основных видов готовой продукции воздухоразделительных цехов приводятся ниже.

**Кислород.** В зависимости от назначения кислород выпускается следующих видов: технический, медицинский и технологический. Технический и медицинский кислород выпускают в газообразном и жидком виде; технологический — только в газообразном.

*Технический газообразный кислород* вырабатывают трех сортов (ГОСТ 5583—68): первого, с содержанием не менее 99,7% $O_2$; второго — не менее 99,5% $O_2$ и третьего — не менее 99,2% $O_2$; остальное — аргон и азот (от 0,3 до 0,8%). Количество водяных паров для всех сортов кислорода при 20 °С и 760 *мм рт. ст.* не должно превышать 0,005 *г/м*$^3$, что соответствует температуре насыщения (точке росы) при 760 *мм рт. ст.* не выше минус 63 °С. Содержание водорода в кислороде, получаемом электролизом воды, допускается не более 0,7%.

*Медицинский газообразный кислород.* Для медицинских целей по ГОСТ 5583—68 поставляется газообразный кислород второго сорта, т. е. содержащий не менее 99,5% $O_2$. По соглашению с потребителем допускается поставка кислорода третьего сорта (не менее 99,2% $O_2$). Медицинский кислород не должен содержать вредных для человеческого организма примесей — двуокиси и окиси углерода, газообразных кислот и оснований, озона, а также других газов-окислителей; не должен иметь запаха. Проверка медицинского кислорода на содержание вредных примесей производится



методами, предусмотренными в указанном ГОСТ. Кислород, полученный электролизом воды, не может применяться в качестве медицинского.

Отсутствие вредных примесей в медицинском кислороде, получаемом из атмосферного воздуха глубоким охлаждением, может быть гарантировано поставщиком; в этом случае контрольные испытания на содержание этих примесей при сдаче готовой продукции не производятся.

Кислород перед отпуском потребителю принимает ОТК завода-поставщика для проверки соответствия требованиям ГОСТ; каждая партия кислорода снабжается паспортом, удостоверяющим качество продукции. На баллоны с кислородом для медицинских целей наклеивается этикетка «Кислород медицинский».*

*Технологический кислород* содержит 90—99,5% $O_2$ и применяется для интенсификации процессов на заводах металлургической, химической и других отраслей промышленности. Выпускается в соответствии с требованиями того технологического процесса, в котором кислород используется.

Жидкий кислород выпускают двух видов: технический и медицинский, которые согласно ГОСТ 6331—68 должны отвечать следующим требованиям:

| | Технический кислород | | | Медицинский кислород |
|---|---|---|---|---|
| | Первый сорт | Второй сорт | Третий сорт | |
| Содержание кислорода, %, не менее | 99,7 | 99,5 | 99,2 | 99,2 |
| Содержание примесей* | | | | |
| ацетилена, *мл/дм*$^3$ | От. | От. | 0,04 | От. |
| масла, *мг/дм*$^3$ | От. | От. | 0,01 | От. |
| окиси углерода, газообразных кислот и оснований, озона, а также других газов-окислителей | Н. н. | Н. н. | Н. н. | К. и. |
| влаги и механических примесей | От. | От. | Н. н. | От. |
| Запах* | Н. н. | Н. н. | Н. н. | От. |

* Условные обозначения: От.—отсутствие; Н. н.—не нормируется; К. и.—должны выдерживаться качественные испытания по ГОСТ 6331—68.

**Азот.** Предприятия вырабатывают азот следующих видов: технический, медицинский и особой чистоты.

* Государственным комитетом стандартов Совета Министров СССР разрешено до 1 июля 1972 г., в отступление от ГОСТ 5583—68 и ГОСТ 6331—68, выпускать кислород концентрацией (в % объемн.), не ниже: газообразный технический первого сорта 99,5; второго сорта 99,2; третьего сорта 98,3; медицинский 99,2, содержание влаги не более 0,07 *г/м*$^3$;
жидкий сорта А—99,2; сорта Б—99,0; медицинский — 99,2.

Технический азот, газообразный и жидкий, согласно ГОСТ 9293—59* должен отвечать следующим требованиям*:

| | Газообразный азот | | | Жидкий азот |
|---|---|---|---|---|
| | Электровакуумный | Первый сорт | Второй сорт | |
| Содержание, % | | | | |
| азота, не менее | 99,9 | 99,5 | 99 | 96 |
| кислорода, не более | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 4 |
| паров воды | Соответственно пределам насыщения газа при температуре его в баллоне | | | |

Медицинский азот не должен содержать CO, $CO_2$, газообразных кислот и оснований, а также озона и других окислителей. Эти примеси определяют методами, принятыми для медицинского кислорода по ГОСТ 5583—68. Отсутствие вредных примесей в медицинском азоте, получаемом из атмосферного воздуха глубоким охлаждением, может быть гарантировано поставщиком; в этом случае испытаний при сдаче продукции не производят. В баллонах, наполняемых азотом, не должно быть воды; на них наносят надпись «Азот медицинский». Перекачку азота производят только компрессорами с водяной смазкой цилиндров или без смазки.

Азот газообразный, жидкий технический и медицинский принимает ОТК предприятия-поставщика в соответствии с ГОСТ 9293—59.*

Газообразный азот поставляют в баллонах по ГОСТ 949—57 под избыточным давлением 150±5 *кгс/см*$^2$ при 20 °С. Количество жидкого азота выражают в кубических метрах газообразного азота при давлении 760 *мм рт. ст.* и температуре 20 °С. При пересчете принимают, что 1 *кг* жидкого азота соответствует 0,86 *м*$^3$ газообразного азота, а 1 *дм*$^3$ жидкого азота — 0,69 *м*$^3$ газообразного.

Азот особой чистоты поставляется по РТУ 6-02-375—66 и должен содержать: азота не менее 99,997%, кислорода не более 0,003%, паров воды не более 0,02 *г/м*$^3$ при 760 *мм рт. ст.* Отпускается в стальных баллонах малой и средней емкости по ГОСТ 949—57, снабженных мембранными вентилями.

**Аргон.** Вырабатываются технический и чистый аргон, а также аргон особой чистоты. Аргон используется как инертный газ.

Технический аргон согласно МРТУ 6-02-291—64 должен содержать не более 12—16% азота, 0,4% кислорода, 0,3% двуокиси углерода. Воды в виде капель быть не должно. Используется в качестве сырья для получения чистого аргона.

Чистый газообразный аргон. По ГОСТ 10157—62 чистый газообразный аргон вырабатывается трех марок:

марка А — для сварки и плавки активных и редких металлов (титана, циркония, ниобия) и сплавов на их основе, а также для

* Звездочка, стоящая у номера ГОСТ, означает, что в данный ГОСТ были внесены изменения; она входит в обозначение ГОСТ.



сварки особо ответственных изделий из других материалов на заключительных этапах изготовления;

марка Б — для плавки и сварки плавящимся и неплавящимся (вольфрамовым) электродом сплавов на основе алюминия и магния, а также других сплавов, чувствительных к примесям газов, растворимых в металле;

марка В — для сварки и плавки нержавеющих хромоникелевых жаропрочных сплавов, различных легированных сталей и чистого алюминия.

По составу чистый газообразный аргон должен соответствовать следующим показателям:

| | А | Б | В |
|---|---|---|---|
| Содержание, % | | | |
| аргона, не менее | 99,99 | 99,96 | 99,90 |
| кислорода, не более | 0,003 | 0,005 | 0,005 |
| азота, не более | 0,01 | 0,04 | 0,10 |
| Содержание паров воды при 760 *мм рт. ст.*, *г/м*$^3$, не более | 0,03 | 0,03 | 0,03 |

Содержание азота и влаги проверяют в каждом баллоне, а кислорода — в каждом пятом баллоне.

Баллоны с чистым аргоном окрашивают в серый цвет и зеленой краской наносят полосу и надпись «Аргон чистый». Под колпак баллона вкладывают этикетку с указанием номера баллона, даты отпуска и марки аргона. Каждая партия чистого аргона сопровождается документом, удостоверяющим его качество.

Аргон особой чистоты* (МРТУ 6-02-377—66) должен содержать не более 0,005% азота, 0,001% кислорода, 0,02 *г/м*$^3$ паров воды при 760 *мм рт. ст.* Поставляется потребителям в стальных баллонах малой и средней емкости (ГОСТ 949—57) с мембранными вентилями или в запаянных стеклянных баллонах емкостью около 2 *дм*$^3$; из баллонов предварительно удаляется воздух вакуумированием. Абсолютное давление газа в стеклянном баллоне 600—650 *мм рт. ст.*

**Редкие газы.** К ним относятся: криптон, криптоно-ксеноновая смесь, ксенон, неоно-гелиевая смесь, неон. Перечисленные продукты получают из атмосферного воздуха попутно с получением кислорода и азота.

*Криптон и криптоно-ксеноновая смесь.* Эти газы применяют в электроламповой и электровакуумной промышленности. Состав

* Азот, аргон и другие газы особой чистоты содержат примесей менее 0,001%, что соответствует пределу чувствительности метода спектрального анализа; поэтому такие газы называют также «спектрально-чистыми». Для количественного определения в них примесей используют масс-спектрограф, дающий чувствительность анализа $10^{-5}$—$10^{-7}$% примесей.

криптона и криптоно-ксеноновой смеси (ГОСТ 10218—67) приводится ниже:

| | Криптон чистый | Криптон технический | Криптоно-ксеноновая смесь |
|---|---|---|---|
| Содержание, % | | | |
| криптона, не менее | 98,9 | 99,5* | 94,5** |
| ксенона, не более | 1,0 | Н. н. | 5,0*** |
| кислорода, не более | 0,001 | 0,01 | 0,05 |
| азота + аргона, не более | 0,05 | 0,4 | 0,4 |
| двуокиси углерода, не более | 0,005 | 0,01 | 0,01 |
| углеводородов, не более | 0,003 | 0,005 | 0,01 |
| водорода, не более | 0,001 | 0,005 | Н. н. |
| Содержание водяных паров, *г/м*³, не более | 0,03 | 0,076 | 0,076 |
| Соответствующая температура насыщения при давлении 760 *мм рт. ст.*, °С, не выше | —50 | —42 | —42 |

* Криптон+ксенон. ** Не более. *** Не менее. Условные обозначения: Н. н.—не нормируется.

Пробу газа для анализа отбирают из каждого баллона. Криптон и криптоно-ксеноновую смесь поставляют в баллонах малой и средней емкости (ГОСТ 949—57) под давлением от 50 до 100 *кгс/см*² при 20 °С. Температура газа в баллоне принимается равной температуре окружающей среды; наполненный баллон перед испытанием выдерживают в этой среде не менее 5 *ч*. Баллоны должны иметь мембранные вентили типа КВ-1М или КВБ-53 с латунными заглушками. Каждый наполненный баллон снабжается свидетельством о качестве газа.

Баллоны с криптоном и криптоно-ксеноновой смесью окрашивают в черный цвет; в верхней части баллона желтой краской наносят соответственно одну и две полосы и надпись: «Криптон» или «Криптон-ксенон». Баллоны, поступающие от потребителя, должны иметь остаточное давление не ниже 0,5 *кгс/см*². Баллоны перед первым наполнением, а также поступившие без остаточного давления, должны быть прогреты 3—4 *ч* при 150 °С и подвергнуты откачке до остаточного давления не выше 0,01 *мм рт. ст.*

*Ксенон.* Этот газ используется в производстве электроосветительных ламп и электровакуумных приборов; должен отвечать следующим требованиям (ГОСТ 10219—67):

| | Ксенон высокой чистоты | Ксенон чистый |
|---|---|---|
| Содержание, % | | |
| ксенона, не менее | 99,9 | 99,4 |
| криптона, не более | 0,05 | 0,5 |
| кислорода, не более | 0,001 | 0,005 |
| азота, не более | 0,03 | 0,05 |
| углеводородов, не более | 0,001 | 0,003 |
| двуокиси углерода, не более | 0,001 | 0,005 |
| водорода, не более | 0,001 | 0,005 |
| Содержание водяных паров, *г/м*³, не более | 0,016 | 0,053 |
| Соответствующая температура насыщения при давлении 760 *мм рт. ст.*, °С, не выше | —55 | —45 |



Пробу газа для анализа отбирают из каждого баллона. Ксенон поставляют в баллонах малой емкости (ГОСТ 949—57) под избыточным давлением 50±5 *кгс/см*² при 20 °С, снабженных мембранными вентилями КВ-1М с латунными заглушками и окрашенных в оранжевый цвет; на баллонах черной краской наносят надпись «Ксенон». Каждый баллон сопровождают документом, удостоверяющим качество газа.

*Неоно-гелиевая смесь.* Эта смесь (ТУ МХП 4195—54) содержит: неона и гелия (в сумме) от 20% и более, кислорода — не более 1%, остальное — азот. Смесь отбирают из-под крышки конденсатора воздухоразделительного аппарата двойной ректификации, где скапливаются газообразные неон и гелий, имеющие более низкую температуру конденсации, чем азот. Для обогащения неоно-гелиевой смеси неоном и гелием применяют специальный аппарат-трубчатку (см. гл. 4). Смесь используется в электроосветительной технике в качестве сырья для получения неона, требуемого для производства сигнальных, газосветных ламп и других приборов.

*Неон особой чистоты* (МРТУ 6-02-376—66) должен содержать азота не более 0,01%, гелия не более 0,1%, кислорода не более 0,001%, водорода не более 0,001%, паров воды не более 0,02 *г/м*³ при 760 *мм рт. ст.* Поставляется в стальных баллонах малой и средней емкости по ГОСТ 949—57 с мембранными вентилями.

*Гелий высокой чистоты* поставляется по МРТУ 51-77—66 и должен содержать гелия не менее 99,985%, водорода не более 0,0025%, азота не более 0,005%, кислорода не более 0,002%, углеводородов не более 0,003%, паров воды соответственно точке росы не выше —55 °С. Наполняется в стальные баллоны малой и средней емкости по ГОСТ 949—57 с мембранными вентилями.

**Жидкий воздух.** На воздухоразделительных установках попутно с основной продукцией иногда также получают жидкий и сжатый воздух. Под термином жидкий воздух обычно понимают кубовую жидкость, сливаемую из воздухоразделительного аппарата и используемую в качестве хладоагента при лабораторных и производственных работах. Жидкий воздух содержит до 50—55% кислорода, остальное азот.

**Сжатый воздух.** Это атмосферный воздух, накаченный компрессором в баллоны под избыточным давлением до 165—200 *кгс/см*²; используется для технических целей.

ГЛАВА 2

# СЖИЖЕНИЕ ВОЗДУХА

## 2.1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ И ИХ СМЕСЕЙ

Вещества, находящиеся при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении в газообразном состоянии, условно разделяют на пары и газы. Последние рассматриваются как сильно перегретые пары. Поэтому большинство промышленных газов трудно превратить в жидкость, в то время как пары жидкостей легко сжижаются уже при сравнительно небольшом охлаждении или при соответствующем повышении давления. Для того чтобы не менять установившиеся представления, в технике сохраняются термины «газ» и «пар», так как в противном случае «паром» пришлось бы называть такие вещества, как воздух, азот и другие, обычно относимые к группе газов. Принято считать, что газы имеют устойчивое агрегатное состояние, а пары — неустойчивое.

К газам относят, например, воздух, азот, кислород, водород, аммиак, двуокись углерода, окись углерода, метан, ацетилен, гелий, к парам — водяной пар, пары бензина и др.

Состояние газа характеризуют следующие основные параметры: *давление, температура, удельный объем,* а пара, кроме того, — *температура сжижения и энтальпия (теплосодержание).*

Процессы, характеризующиеся изменением этих параметров и называемые *процессами изменения состояния газов и паров,* подчиняются ряду законов, на основе которых можно проводить расчет машин и аппаратуры.

**Давление.** Величина давления газа (пара) измеряется в различных единицах. Установлены следующие основные единицы давления (ГОСТ 7664—61): миллиметр ртутного столба (*мм рт. ст.*), техническая атмосфера (*ат, кгс/см²*, или *кГ/см²*), миллиметр водяного столба (*мм вод. ст.*).

В зависимости от начального уровня, от которого производится отсчет, различают давление абсолютное и избыточное. Давление, измеренное от нуля (абсолютного вакуума), называется *абсолютным* и обозначается $p_а$. Давление, измеренное от атмосферного (барометрического) давления, называется *избыточным* и обозначается $p_и$. Манометр всегда показывает избыточное давление, которое поэтому иногда называют *манометрическим.* Для определения абсолютного давления нужно к манометрическому прибавить величину атмосферного барометрического давления, выраженную в тех же единицах.

Под термином давление жидкости или газа подразумевается, как правило, абсолютное давление. Абсолютное давление входит в уравнения, связывающие параметры вещества (например, уравнение Клапейрона — см. ниже). Избыточное давление принимают в уравнениях, по которым рассчитывают прочность сосудов, содержащих газ или жидкость.

Если давление в сосуде ниже атмосферного, газ или пар в нем находятся в разреженном состоянии (под вакуумом).

Наряду с технической атмосферой применяется также физическая атмосфера (*атм*), равная давлению столба ртути высотой 760 *мм* при температуре 0 °С в точке, где ускорение силы тяжести составляет 980,655 *см/сек²*.

В международной системе единиц СИ (Система Интернациональная) за единицу давления принято давление в 1 ньютон на 1 квадратный метр (*н/м²*). Эта величина очень мала и обычно ее укрупняют: килоньютон на квадратный метр (*кн/м²*), меганьютон на квадратный метр (*Мн/м²*). Для технических расчетов обычно принимают, что 1 *ат* (1 *кгс/см²*, 1 *кГ/см²*) равна приближенно 0,1 *Мн/м²*. Иногда используют внесистемную единицу давления: бар (*бар*), равный $10^5$ *н/м²*, а также дольные единицы бара — миллибар (*мбар*) и микробар (*мкбар*)*.

Соотношение между единицами давления приведено ниже:

| | Физическая атмосфера, *атм* | Техническая атмосфера, *ат, кгс/см², кГ/см²* | *мм рт. ст.* |
|---|---|---|---|
| 1 физическая атмосфера (*атм*) | 1 | 1,0332 | 700 |
| 1 техническая атмосфера (*ат, кгс/см², кГ/см²*) | 0,968 | 1 | 735,6 |
| 1 *мм рт. ст.* | 0,001316 | 0,00136 | 1 |
| 1 *мм вод. ст.* | 0,0000968 | 0,0001 | 0,07356 |
| 1 *м вод. ст.* | 0,0968 | 0,1 | 73,56 |
| 1 *н/м²* | $0{,}98692 \cdot 10^{-5}$ | $1{,}02 \cdot 10^{-5}$ | 0,0075 |
| 1 *бар* | 0,98692 | 1,02 | 750,1 |

| | *мм вод. ст.* | *м вод. ст.* | *н/м²* | *бар* |
|---|---|---|---|---|
| 1 физическая атмосфера (*атм*) | 10332 | 10,332 | 101325 | 1,01325 |
| 1 техническая атмосфера (*ат, кгс/см², кГ/см²*) | 10000 | 10 | 98066,5* | 0,980665 |
| 1 *мм рт. ст.* | 13,595 | 0,013595 | 133,332 | 0,001333 |
| 1 *мм вод. ст.* | 1 | 0,001 | 9,80665 | 0,000098 |
| 1 *м вод. ст.* | 1000 | 1 | 9806,65 | 0,098067 |
| 1 *н/м²* | 0,102 | 0,000102 | 1 | 0,00001 |
| 1 *бар* | 10200 | 10,2 | $10^5$ | 1 |

* Около 0,1 *Мн/м²*.

* Внесистемная единица бар допускается ГОСТ 7664—61 «Механические единицы».

**Температура.** Степень нагретости тела называется *температурой*. В международной системе единиц в качестве единицы температуры принят градус Кельвина (°К) по термодинамической температурной шкале, называемой также *абсолютной шкалой*. По этой шкале установлено точное значение 273,16 °К для температуры тройной точки воды — единственной экспериментальной постоянной (реперной) точки для шкалы Кельвина*.

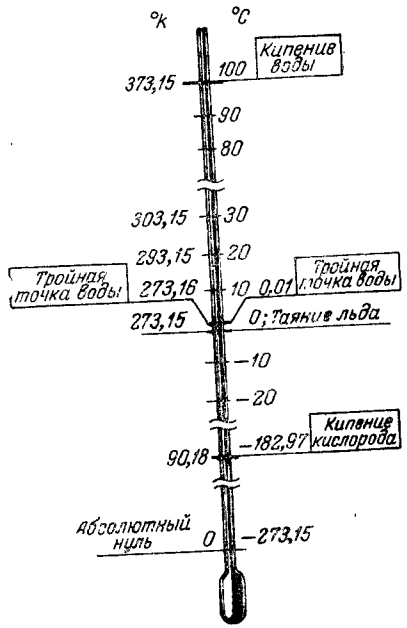



Рис. 2.1. Первичные постоянные точки шкал Кельвина (°К) и Международной практической (градусы Цельсия, °С); (точки затвердевания цинка, серебра и золота не нанесены).

Практические измерения проводятся по Международной практической температурной шкале 1948 г. Для этой шкалы в качестве первичных постоянных точек при нормальном давлении (1 *атм* = 101 325 *н/м²* = = 760 *мм рт. ст.*) были приняты: температура кипения кислорода (—182,97 °С), тройная точка воды (0,01 °С), температура кипения воды (100 °С) и температуры затвердевания цинка (419,505 °С), серебра (960,8 °С) и золота (1063 °С). Международная шкала соответствует стоградусной шкале (Цельсия, °С), в которой за 0° принята температура таяния льда (при 1 *атм*), а за 100° — температура кипения воды (при 1 *атм*). Температуру обозначают: в абсолютной шкале буквой $T$, в международной — $t$, а разность температур — *град*. Изменение температуры на 1 °С соответствует изменению ее на 1° Кельвина, так как 1 °С = 1 °К.

Соотношения между температурами, выраженными в абсолютной шкале ($T$, °К) и международной стоградусной ($t$, °С), выражаются простыми зависимостями:

$$t = T - 273{,}15\ (°C) \qquad (2.1)$$

$$T = t + 273{,}15\ (°K) \qquad (2.2)$$

так как нуль абсолютной шкалы лежит ниже точки таяния льда на 273,16—0,01 = 273,15 *град* (рис. 2.1).

Например, температура воздуха 20 °С по абсолютной шкале равна 20 + 273,15 = 293,15 °К. Температура кипения азота по абсолютной шкале равна 77,4 °К, что по шкале Цельсия соответствует 77,4—273,15 = —195,75 °С. Для упрощения расчетов часто приближенно принимают, что $t = T - 273°$ и $T = t + 273°$.

* Тройная точка воды — это температура равновесия между льдом, водой и водяным паром; она находится на 0,01 °К выше точки таяния льда.



В США и Англии применяется температурная шкала Фаренгейта (°Ф). Для этой шкалы за нуль принята температура таяния смеси льда с нашатырем или поваренной солью (—17,77 °С), а расстояние между точками таяния льда и кипения воды разделено на 180 частей. Таким образом, 0 °С соответствует +32 °Ф, а 100 °С отвечает +212 °Ф. Для перевода °Ф в °С пользуются формулой

$$t = \frac{5}{9} \cdot t_ф - 17{,}77$$

**Пример.** По шкале Фаренгейта $t_ф = -184$ °Ф. По шкале Цельсия это соответствует $t = \frac{5}{9}(-184) - 17{,}77 = -120$ °С.

**Плотность и удельный объем.** Плотностью называется *масса 1 м³ вещества (газа) в килограммах**; она обозначается греческой буквой ρ (ро) и выражается в *кг/м³*. Удельным объемом называется *объем 1 кг вещества (газа) в кубических метрах*; обозначается латинской буквой $v$ и выражается в *м³/кг*.

Плотность и удельный объем являются величинами обратными друг другу, т. е. $\rho = 1/v$.

Чтобы определить массу газа в данном объеме, нужно умножить плотность на объем газа. Например, баллон вмещает 6 *м³* кислорода плотностью 1,43 *кг/м³*; масса всего кислорода в баллоне составит 1,43 · 6 = 8,58 *кг*.

Под удельным весом вещества (газа), обозначаемым греческой буквой γ (гамма), понимают *вес (сила тяжести) единицы объема вещества (газа)*; в международной системе единиц измеряется в *н/м³*. Удельный вес вещества не является постоянной (справочной) величиной и зависит от ускорения силы тяжести (притяжения) в точке измерения. Удельный вес выражают через плотность ρ и ускорение $g$ силы тяжести в точке измерения:

$$\gamma = \frac{F}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g\ н/м^3 \qquad (2.3)$$

где $F$ — сила тяжести (вес) вещества, *н*;
$V$ — объем вещества, *м³*;
$m$ — масса вещества, *кг*.

С введением системы СИ ранее применяющееся выражение удельного веса в единицах плотности (*кг/м³*) не должно использоваться.

* Плотность жидкостей и твердых веществ часто выражают в *г/см³*, соответственно удельный объем в *см³/г*.

Для смесей газов плотностью $\rho_{см}$ удельный объем $v_{см}$ и удельный вес $\gamma_{см}$ равны:

$$\rho_{см} = 0{,}01\,(\rho_1 m_1 + \rho_2 m_2 + \cdots + \rho_n m_n) \qquad (2.4)$$

$$v_{см} = 0{,}01\,(v_1 m_1 + v_2 m_2 + \cdots + v_n m_n) \qquad (2.5)$$

$$\gamma_{см} = 0{,}01\,(\gamma_1 m_1 + \gamma_2 m_2 + \cdots + \gamma_n m_n) \qquad (2.6)$$

где $m_1, m_2, \ldots, m_n$ — содержание отдельных газов в смеси в объемных (при определении $\rho_{см}$ и $\gamma_{см}$) или весовых (при определении $v_{см}$) процентах.

Плотность и удельный объем газа изменяются в зависимости от температуры и давления. Поэтому при их обозначении указывают температуру и давление, которым они соответствуют. В справочниках и руководствах приводятся значения плотности (иногда неправильно называемой удельным весом), отнесенные к следующим температурам и давлениям: 0 °С и 760 *мм рт. ст.*; 20 °С и 760 *мм рт. ст.*; 20 °С и 1 *кгс/см²* (1 *кГ/см²*, 1 *ат*).

Объем газа при 0 °С и 101 325 *н/м²* (760 *мм рт. ст.*) называется *объемом при нормальных физических условиях* и обозначается $V_н$.

Объем газа при температуре 20 °С (293,15 °К) и давлении 101 325 *н/м²* (760 *мм рт. ст.*) называется *объемом при стандартных* условиях, так как эти условия установлены ГОСТ 2939—63 для определения объема газа*, и обозначается $V_{ст}$.

Объем газа приводят к нормальным (или к стандартным) условиям по формуле

$$V_н = V_t \frac{p_t\,(273{,}15 + t_0)}{p_0\,(273{,}15 + t)} \qquad (2.7)$$

где $V_н$ — объем газа при нормальных (или $V_{ст}$ — при стандартных) условиях, *м³*;
$V_t$ — объем газа при температуре $t$ и давлении $p_t$, *м³*;
$p_t$ — абсолютное давление, при котором измерен объем газа, *мм рт. ст.*; *кгс/см²*; *н/м²*;
$p_0$ — давление при нормальных или стандартных условиях, выраженное в тех же единицах, что и $p_t$;
$t_0$ — температура при нормальных (0 °С) или стандартных (20 °С) условиях;
$t$ — температура, при которой измерен объем газа, °С.

**Основное уравнение состояния газов.** Зависимость между давлением, объемом и температурой газа определяется уравнением, называемым *характеристическим* или *уравнением состояния газа* (уравнение Клапейрона)

$$pV = mRT \text{ дж} \qquad (2.8)$$

* Использовавшиеся прежде в технической литературе и расчетах обозначение *нм³* и соответствующий ему термин «нормальный кубический метр» с переходом на международную систему единиц СИ не должны применяться, поскольку обозначение *нм³* в единицах СИ читается как «кубический нанометр», 1 *нм³* = $= 10^{-27}$ *м³*.



где $p$ — давление абсолютное; *н/м²*;
$V$ — объем газа, *м³*;
$m$ — масса газа, *кг*;
$R$ — газовая постоянная, *дж/(кг·град)*;
$T$ — абсолютная температура, °К.

Для газа массой в 1 *кг* характеристическое уравнение имеет вид:

$$pv = RT \quad \text{или} \quad \rho = \frac{1}{v} = \frac{p}{RT} \text{ кг/м}^3 \qquad (2.8,a)$$

где $\rho$ — плотность газа, *кг/м³*;
$v$ — удельный объем газа при давлении $p$, *м³/кг*.

Газовая постоянная в единицах СИ имеет размерность:

$$R = \frac{8314{,}4}{M} \text{ дж/(кг·град)} \qquad (2.8,б)$$

где $M$ — молекулярный вес газа.

Газовая постоянная представляет собой работу расширения газа массой в 1 *кг* при нагревании его под постоянным давлением на 1 °К.

По уравнению состояния, зная любые два параметра из трех ($p$, $v$, $T$), можно определить третий, а следовательно, и состояние газа в данных условиях.

**Пример.** Баллон емкостью 40 *л* (*дм³*) наполнен кислородом до абсолютного давления 155 *кгс/см²* при 30 °С. Какое давление будет в баллоне при понижении температуры газа в нем до — 10 °С?

Напишем уравнение состояния для двух температур: для +30 °С, т. е. $T_1 = 30 + 273 = 303$ °К, и для —10 °С, т. е. $T_2 = -10 + 273 = 263$ °К; $p_1 = 155$ *кгс/см²*; $V_1 = V_2 = 40$ *дм³* = 0,040 *м³*:

$$p_1 V_1 = RT_1 \quad \text{и} \quad p_2 V_2 = RT_2$$

Разделив второе уравнение на первое, получим:

$$\frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} = \frac{RT_2}{RT_1}$$

откуда после сокращений:

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 155 \cdot \frac{263}{303} = 134{,}2 \text{ кгс/см}^2$$

**Сжижение газов.** Соответствующим охлаждением газ может быть превращен в жидкость. При охлаждении газа (перегретого пара) от него сначала отнимается теплота перегрева и он превращается в сухой насыщенный пар (рис. 2.2). При дальнейшем охлаждении от газа отнимается дополнительно теплота конденсации и сухой насыщенный пар превращается во влажный, в котором содержатся капельки жидкости. После того как теплота конденсации полностью отнята, весь влажный пар превратится в жидкость. Если начать вновь нагревать полученную жидкость,

она превратится в газ, пройдя те же промежуточные состояния влажного и сухого насыщенного пара. Для того чтобы вся жидкость испарилась, к ней нужно подвести количество тепла, равное теплоте конденсации.

Таким образом, сжижение газа и испарение полученной жидкости (при отсутствии потерь тепла в окружающую среду) являются обратимыми процессами.

Температура сжижения газа зависит от давления: чем меньше давление газа, тем ниже температура его сжижения; с увеличением давления температура сжижения повышается. Однако для каждого газа существует определенная температура, выше которой его нельзя превратить в жидкость ни при каком, даже очень высоком давлении. Эта температура называется *критической*. Давление, при котором происходит сжижение газа, имеющего критическую температуру, также называется *критическим*.

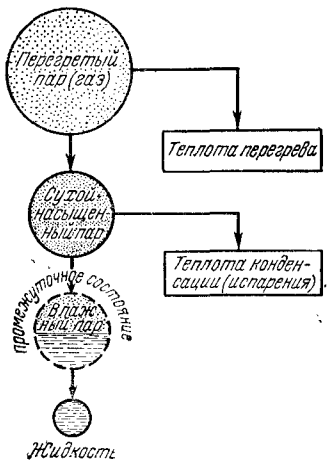



Рис. 2.2. Схема сжижения газа.

Значения температур сжижения (кипения) при 760 *мм рт. ст.*, критических температур и критических давлений, а также некоторых других показателей для промышленных газов приведены в табл. 2.1.

Из табл. 2.1 видно, что газы с положительной критической температурой (аммиак, двуокись углерода, пропан, фреон-12, ацетилен и др.) могут превращаться в жидкость при нормальной окружающей температуре без охлаждения, только повышением давления. Для сжижения газов с отрицательной критической температурой (азот, кислород, аргон, водород, гелий и др.) их следует охладить до очень низкой температуры или повысить давление и охладить до критической температуры или ниже.

Сжижение воздуха при нормальном атмосферном давлении начинается при —191,8 °С (81,35 °К) и заканчивается при —193,7 °С (79,45 °К).

Это объясняется тем, что воздух представляет собой в основном смесь кислорода и азота.

В начале процесса в бо́льших количествах конденсируется кислород, а в конце — азот, для сжижения которого требуется более низкая температура.

Если воздух находится при критическом абсолютном давлении, т. е. при $p_{кр}=37{,}2$ *кгс/см*$^3$ ($36{,}5\cdot10^5$ *н/м*$^2$), то он начинает сжижаться при —140,7 °С (132,45 °К). Если давление меньше критического, но больше атмосферного, воздух сжижается в интервале температур от —140,7 до —191,8 °С (от 132,45 до 81,35 °К). При



**Таблица 2.1. Основные физические свойства газов**

| Газ | Молекулярный вес, $M$ | Газовая постоянная $R$ | | Газ при °С и 760 *мм рт. ст.* | | | | | отношение теплоемкостей $C_p/C_v$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *кгс·м/(кг·град)* | *дж/(кг·град)* | плотность $\rho$, *кг/м*$^3$ | удельный объем $v$, *м*$^3$*/кг* | теплоемкость, $C_p$ | | | |
| | | | | | | *ккал/(кг·град)* | *кдж/(кг·град)* | | |
| Азот | 28,02 | 30,26 | 296,7 | 1,251 | 0,800 | 0,250 | 1,0467 | | 1,401 |
| Аммиак | 17,03 | 49,79 | 488,3 | 0,771 | 1,296 | 0,488 | 2,0430 | | 1,317 |
| Аргон | 39,94 | 21,23 | 208,2 | 1,784 | 0,561 | 0,125 | 0,5233 | | 1,665 |
| Ацетилен | 26,04 | 32,56 | 319,2 | 1,171 | 0,854 | 0,3845 | 1,6098 | | 1,251 |
| Водород | 2,016 | 420,6 | 4124,7 | 0,090 | 11,127 | 3,408 | 14,2680 | | 1,407 |
| Воздух (сухой) | 28,97 | 29,27 | 283,0 | 1,292 | 0,774 | 0,2396 | 1,0030 | | 1,40 |
| Гелий | 4,003 | 211,8 | 2077,1 | 0,179 | 5,602 | 1,265 | 5,2962 | | 1,665 |
| Двуокись углерода | 44,01 | 19,27 | 189,0 | 1,977 | 0,506 | 0,1946 | 0,8147 | | 1,301 |
| Кислород | 32,00 | 26,49 | 259,8 | 1,429 | 0,700 | 0,2185 | 0,9148 | | 1,396 |
| Криптон | 83,7 | 10,13 | 99,3 | 3,745 | 0,267 | 0,0595 | 0,2491 | | 1,67 |
| Ксенон | 131,3 | 6,457 | 63,3 | 5,897 | 0,170 | 0,0379 | 0,1587 | | 1,666 |
| Метан | 16,04 | 52,86 | 518,4 | 0,717 | 1,395 | 0,5172 | 2,1654 | | 1,314 |
| Неон | 20,18 | 42,01 | 412,9 | 0,900 | 1,111 | 0,248 | 1,0483 | | 1,67 |
| Озон | 48,00 | 17,66 | 173,2 | 2,22 | 0,450 | 0,190 | 0,7955 | | 1,29 |
| Окись углерода | 28,01 | 30,27 | 296,8 | 1,25 | 0,800 | 0,2483 | 1,0416 | | 1,401 |
| Пропан | 44,09 | 19,23 | 188,6 | 2,004 | 0,499 | 0,3701 | 1,5495 | | 1,138 |
| Пропилен | 42,08 | 20,15 | 197,5 | 1,915 | 0,522 | 0,349 | 1,4612 | | 1,171 |
| Фреон-12 | 120,9 | 7,011 | 68,6 | 5,510 | 0,182 | 0,136 | 0,5694 | | 1,13 |
| Этан | 30,07 | 28,19 | 276,4 | 1,357 | 0,737 | 0,3934 | 1,6471 | | 1,202 |
| Этилен | 28,05 | 30,22 | 296,3 | 1,261 | 0,830 | 0,3486 | 1,4595 | | 1,256 |

| Газ | Критические параметры | | | | Жидкость при 760 *мм рт. ст.* | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | температура, °C | давление абсолютное | | плотность, *кг/м³* | Температура кипения | | теплота парообразования | | плотность, *кг/м³* | объем газа (при 0 °C 760 *мм рт. ст.*) $V'$, образующегося из 1 *дм³* жидкости, *дм³* | температура затвердевания | |
| | | *кгс/см²* | $\frac{1}{\varphi} \cdot 10^{-1} \cdot (\varphi w/н)$ | | °C | °K | *ккал/кг* | *кдж/кг* | | | °C | °K |
| Азот | —146,9 | 33,54 | 32,9 | 311,0 | —195,75 | 77,4 | 47,58 | 199,2 | 808 | 646 | —210,0 | 63,15 |
| Аммиак | +132,4 | 111,5 | 109,3 | 235,0 | —33,4 | 239,75 | 327,1 | 1369,5 | 683 | 885 | —77,7 | 195,45 |
| Аргон | —122,4 | 48,00 | 47,1 | 531,0 | —185,8 | 87,35 | 38,9 | 162,9 | 1403 | 787 | —189,3 | 83,85 |
| Ацетилен | +35,2 | 61,7 | 60,4 | 231,0 | —83,8 | 189,35 | 149,1 | 624,2 | 622 | 531 | —80,6 | 192,55 |
| Водород | —239,9 | 12,80 | 12,5 | 31,0 | —252,8 | 20,35 | 107,3 | 449,2 | 70,9 | 789 | —259,2 | 13,95 |
| Воздух (сухой) | —140,7 | 37,2 | 36,5 | 340,5 | —191,8 | 81,35 | 49,07 | 205,4 | 861 | 666 | —213,0 | 60,15 |
| Гелий | —268,0 | 2,26 | 2,2 | 69,3 | —268,9 | 4,25 | 4,92 | 20,6 | 125 | 700 | —272,2 | 0,95 |
| Двуокись углерода | +31,0 | 72,9 | 71,5 | 468,0 | —78,5 | 194,65 | 88,2 | 369,3 | 1178 | 596 | —56,6 | 216,55 |
| Кислород | —118,8 | 49,71 | 48,7 | 429,9 | —182,97 | 90,18 | 50,92 | 213,2 | 1140 | 798 | —218,4 | 54,75 |
| Криптон | —63,8 | 54,18 | 53,1 | 908,5 | —153,2 | 119,95 | 25,7 | 107,6 | 2160,0 | 578 | —157,2 | 115,95 |
| Ксенон | +16,6 | 57,64 | 56,5 | 1099,0 | —108,1 | 165,05 | 23,0 | 96,3 | 3063,0 | 520 | —111,9 | 161,25 |
| Метан | —82,5 | 45,8 | 44,9 | 162,0 | —161,5 | 111,65 | 121,8 | 509,9 | 424,0 | 592 | —182,5 | 90,65 |
| Неон | —228,7 | 26,86 | 26,3 | 483,5 | —246,1 | 27,05 | 21,7 | 90,8 | 1204,0 | 1338 | —248,6 | 24,55 |
| Озон | —5,0 | 67,0 | 65,7 | 537,0 | —112,4 | 160,75 | 60,0 | 251,2 | — | — | —251,4 | 21,75 |
| Окись углерода | —140,2 | 34,53 | 33,9 | 301,0 | —191,5 | 81,65 | 51,6 | 216,0 | 814,0 | 651 | —205,0 | 68,15 |
| Пропан | +96,8 | 42,01 | 41,2 | 220,0 | —42,6 | 230,55 | 101,8 | 426,2 | 582,0 | 290 | —189,9 | 83,25 |
| Пропилен | +92,0 | 45,61 | 44,7 | 233,0 | —47,7 | 225,45 | 105,0 | 439,5 | 610,4 | 31 | —185,2 | 87,95 |
| Фреон-12 | +111,5 | 38,7 | 37,9 | 555,0 | —29,8 | 243,35 | 39,9 | 166,0 | 1486,0 | 270 | —155,0 | 118,15 |
| Этан | +32,3 | 48,20 | 47,3 | 203,0 | —88,6 | 184,55 | 121,0 | 506,6 | 546,2 | 403 | —183,6 | 189,55 |
| Этилен | +9,9 | 50,50 | 49,5 | 2[illegible],0 | —103,5 | 169,65 | 115,3 | 482,7 | 610,4 | 484 | —169,4 | 103,75 |

Примечания: 1. Для приведения к 20 °C и 760 *мм рт. ст.* величину $\rho$ следует разделить, а величины $v$ и $V'$ умножить на коэффициент 1,074.

2. Для ацетилена и двуокиси углерода вместо температуры кипения приведены температуры возгонки.

3. Для воздуха $t = -191,8$ °C—температура начала конденсации; $t = -193,7$ °C—температура начала кипения

температуре выше критической, т. е. выше —140,7 °C (132,45 °K), воздух нельзя превратить в жидкость ни при каком давлении.

**Теплоемкость.** Количество теплоты выражают в малых калориях или грамм-калориях (*кал*) и в больших калориях или килограмм-калориях (*ккал*). В технических расчетах применяется килограмм-калория (килокалория, *ккал*) — количество теплоты, затрачиваемое для нагрева 1 *кг* воды на 1 °C, а именно: с 14,5 до 15,5 °C.

В международной системе единиц СИ за единицу количества теплоты принят джоуль (*дж*), равный работе, производимой силой в 1 ньютон (*н*) при перемещении точки ее приложения на 1 *м*. Поскольку джоуль является малой величиной, при практических расчетах применяют кратные единицы: килоджоуль (*кдж*), мегаджоуль (*Мдж*), равный $10^6$ *дж*, гигаджоуль (*Гдж*), равный $10^9$ *дж*, и тераджоуль (*Тдж*), равный $10^{12}$ *дж*.

При пересчете количества теплоты из одной системы единиц в другую принимаются следующие соотношения:

$$1\ ккал = 1000\ кал = 4186,8\ дж = 4,1868\ кдж$$

$$1\ дж = \frac{1}{4,1868} = 0,24\ кал = 0,00024\ ккал$$

$$1\ кдж = 0,24\ ккал$$

Удельной теплоемкостью называется *количество теплоты, требующееся для нагревания 1 кг вещества на 1 °C.*

Следует различать удельную теплоемкость, измеряемую в *дж/(кг·град)*, и общую теплоемкость системы, измеряемую в *дж/град*. Ниже, говоря об удельной теплоемкости, мы для краткости будем называть ее просто теплоемкостью.

Теплоемкость воды равна единице, или 1 *ккал/(кг·град)*. Теплоемкость латуни равна 0,092, меди — 0,094, низкоуглеродистой стали 0,112, аустенитной хромоникелевой стали 0,120 и алюминия 0,22 *ккал/(кг·град)*.

Теплоемкость газов выше, чем металлов. Например, при абсолютном давлении 1 *кгс/см²* теплоемкость воздуха равна 0,2396, или округленно 0,24, азота 0,25, кислорода 0,2185 *ккал/(кг·град)*.

Для пересчета удельной теплоемкости в единицы СИ и выражения ее в *кдж/(кг·град)* необходимо значение удельной теплоемкости в *ккал/(кг·град)* умножить на коэффициент 4,1868. Например, для воздуха: $0,2396 \cdot 4,1868 = 1,003$ *кдж/(кг·град)*; для азота $0,25 \cdot 4,1868 = 1,0467$ *кдж/(кг·град)*; для кислорода $0,2185 \cdot 4,1868 = 0,9148$ *кдж/(кг·град)*.

Различают теплоемкость газов при постоянном давлении ($C_p$) и при постоянном объеме ($C_v$). Так как при нагревании газа при постоянном давлении затрачивается некоторое дополнительное количество теплоты на расширение газа, то для одного и того же газа теплоемкость при постоянном давлении всегда больше теплоемкости его при постоянном объеме. Темплоемкость газов иногда

относят к 1 $м^3$, называя ее в этом случае *объемной теплоемкостью* в отличие от *массовой**, относимой к 1 *кг* газа.

Теплоемкость газовой смеси равна сумме произведений теплоемкостей, входящих в смесь газов, на их относительные содержания в смеси.

Например, воздух по массе содержит 75,6% азота, 23,1% кислорода и 1,3% аргона. Массовые теплоемкости этих газов соответственно равны: 0,250; 0,2185 и 0,125. Тогда массовая теплоемкость воздуха равна: $0{,}250 \cdot 0{,}756 + 0{,}2185 \cdot 0{,}231 + 0{,}125 \cdot 0{,}013 = 0{,}24$ *ккал/(кг·град)*.

Теплоемкость газов в значительной степени зависит от их температуры и давления. Например, теплоемкость газообразного воздуха заметно возрастает с повышением давления и понижением температуры. Поэтому при расчетах пользуются специальными графиками для определения значения теплоемкости газов при данных параметрах.

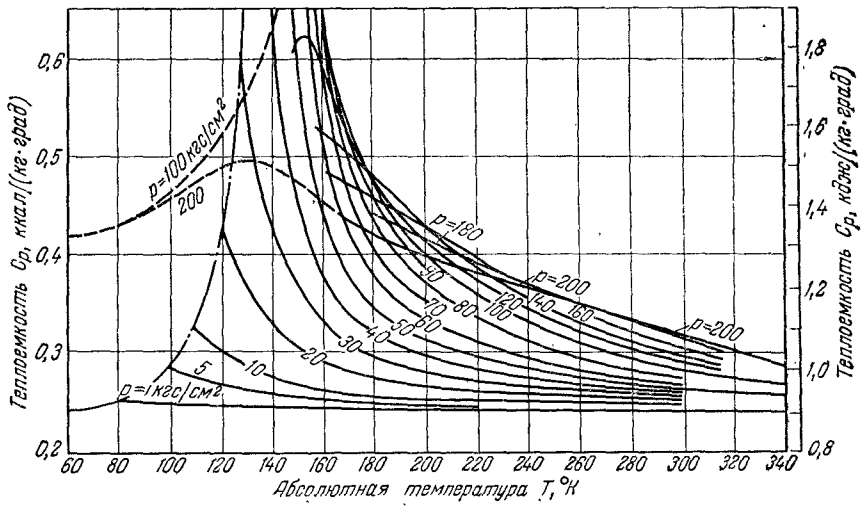



Рис. 2.3. Диаграмма $T$ — $C_p$. Зависимость удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении от температуры.

Из диаграммы $T$—$C_p$ для воздуха (рис. 2,3) видно, что с изменением температуры теплоемкость воздуха изменяется тем больше, чем ближе давление к критическому. С понижением температуры и повышением давления теплоемкость воздуха возрастает. Значение теплоемкости максимально на кривой насыщения (если давление остается ниже критического) и здесь достигает своего наибольшего значения для критической точки. В области выше критического давления теплоемкость при понижении температуры вначале возрастает до какого-то максимального значения, а затем, при дальнейшем понижении температуры, уменьшается. С повышением давления сверх критического величина максимального значения теплоемкости уменьшается.

* Вместо ранее применявшегося термина «весовой».



## 2.2. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕРМОДИНАМИКИ ГАЗОВ

Термодинамикой называется *наука, изучающая закономерности теплового движения и его влияние на свойства физических тел.* Одна из главных задач термодинамики — изучение процессов взаимного превращения теплоты и механической работы.

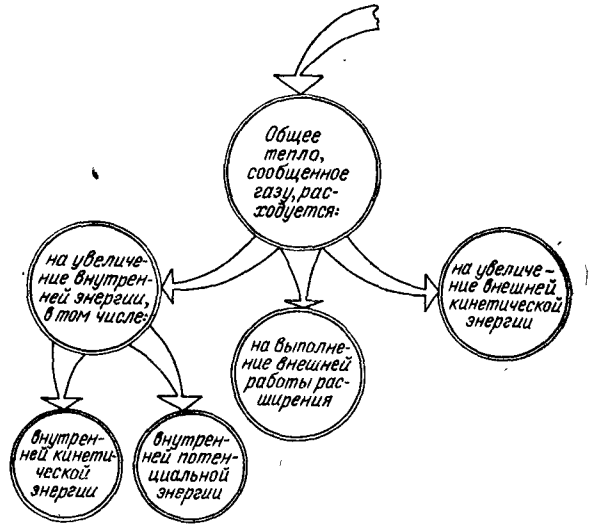



Рис. 2.4. Схема распределения теплоты, подводимой к газу при нагревании.

Сообщаемая газу теплота (рис. 2.4) расходуется на: 1) увеличение внутренней энергии газа; 2) выполнение внешней работы расширения; 3) увеличение внешней кинетической энергии.

Теплота, затрачиваемая на увеличение внутренней энергии газа, в свою очередь делится на две части. Одна часть идет на нагревание газа, т. е. повышение скорости движения его молекул и увеличивает кинетическую энергию газа, что выражается в повышении температуры газа. Другая часть расходуется на внутреннюю работу газа, необходимую для преодоления сил сцепления между молекулами при расширении газа от нагревания; эта теплота увеличивает потенциальную энергию газа.

Теплота, расходуемая на выполнение внешней работы при преодолении сопротивлений, препятствующих рас-

ширению газа, используется, например, для перемещения поршня двигателя, вращения колеса турбины и т. п.

Теплота, затрачиваемая на увеличение внешней кинетической энергии газа (увеличение скорости его движения), играет основную роль в работе турбомашин и реактивных двигателей.

**Первый закон термодинамики** гласит, что *теплота и механическая работа могут превращаться друг в друга в эквивалентных количествах.*

Между теплотой и механической работой существует точное количественное соотношение, впервые установленное Майером и несколько позднее — Джоулем: 1 *ккал* = 427 *кгс·м*; эта величина называется *механическим эквивалентом теплоты.* Обратная величина 1 *кгс·м* работы = 1/427 *ккал* называется *тепловым эквивалентом работы.*

$$1\ квт{\cdot}ч = 860\ ккал = 3{,}6\cdot10^6\ дж = 3600\ кдж$$

$$1\ л.с{\cdot}ч = 632{,}3\ ккал = 2{,}64780\cdot10^6\ дж = 2647{,}7\ кдж$$

$$1\ ккал = 0{,}00116\ квт{\cdot}ч = 0{,}00158\ л.с{\cdot}ч = 4186{,}8\ дж = 4{,}1868\ кдж$$

В Международной системе единиц джоуль принят в качестве единицы для измерения количества теплоты, работы и энергии. Поэтому при пользовании единицами СИ не приходится пересчитывать (на основе механического эквивалента теплоты и теплового эквивалента работы) теплоту в механическую работу и обратно, что значительно упрощает технические расчеты и является одним из преимуществ Международной системы единиц (СИ).

**Энтальпия** (теплосодержание). Если газ или пар нагревается при постоянном давлении, то вся получаемая веществом теплота расходуется только на изменение его энтальпии. Энтальпией или теплосодержанием* в термодинамике принято называть *то количество энергии (тепловой или механической), которое нужно сообщить 1 кг газа, пара или жидкости для того, чтобы при постоянном давлении нагреть его до данной температуры, начиная с какого-то исходного теплового состояния.* В условном начальном состоянии энтальпию кипящей при данном давлении жидкости считают равной нулю. Расчеты проводят всегда с разностью энтальпий, поэтому начальное состояние принято произвольно и не имеет практического значения. Энтальпия обозначается латинской буквой $i$ и выражается в *ккал/кг.* Энтальпия зависит от свойств вещества и поэтому различна для разных газов и паров. Величину изменения энтальпии данного газа можно определить, умножив его теплоемкость $C_p$ при постоянном давлении на разность между начальной и конечной температурами. Пользоваться величиной энтальпии удобно при проведении тепловых расчетов.

* Термин «энтальпия» применяется в термодинамике преимущественно перед термином «теплосодержание».



**Пример 1.** Теплоемкость азота $C_p = 0{,}25$ *ккал/(кг·град)*. Пусть $t_1 = 0$ °С; $t_2 = 100$ °С, тогда изменение энтальпии равно:

$$i_2 - i_1 = C_p(t_2 - t_1) = 0{,}25\,(100 - 0) = 25\ ккал/кг$$

**Пример 2.** Энтальпия жидкого воздуха, кипящего при абсолютном давлении 1 *кгс/см²*, условно принята равной 22,5 *ккал/кг.* Из табл. 2.1 видно, что температура кипения воздуха при 1 *кгс/см²* в конце испарения равна —191,8 °С, а теплота парообразования (испарения) составляет 49,07 *ккал/кг.* Примем теплоемкость воздуха при постоянном давлении $C_p = 0{,}24$ *ккал/(кг·град)*. Тогда энтальпия воздуха, например, при +20 °С составит:

$$i_{1\ кгс/см^2}^{+20\ °C} = 22{,}5 + 49{,}07 + 0{,}24\,(20 + 191{,}8) = 121{,}65\ ккал/кг$$

**Пример 3.** Определить количество теплоты, которое нужно отнять от сжатого воздуха в холодильнике компрессора, чтобы охладить его с +150 °С при 15 *кгс/см²* до +20 °С при том же давлении. Количество охлаждаемого воздуха 900 *кг/ч.*

Определим разность энтальпий воздуха при указанных условиях:

$$\Delta i = 0{,}24\,(150 - 20) = 31{,}2\ ккал/кг$$

Следовательно, в холодильнике от воздуха отводится теплоты:

$$Q = 31{,}2\cdot900 = 28\,080\ ккал/ч$$

**Второй закон термодинамики. Энтропия.** Первый закон термодинамики, являющийся выражением закона сохранения энергии, устанавливает только количественные соотношения при превращениях теплоты в работу и обратно; он не рассматривает условия, при которых возможно превращение одного вида энергии в другой. Эти условия вытекают из второго закона термодинамики, одна из формулировок которого (данная Клаузиусом в 1850 г.) гласит: *теплота не может переходить сама собою от более холодного тела к более нагретому.* Другими словами, самопроизвольно, без затраты работы теплота может переходить только от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. Для передачи теплоты от более холодного тела к более теплому необходимо затратить работу.

Превращение теплоты в работу возможно только при наличии перепада температур между двумя телами, одно из которых является в этом случае холодильником, получающим часть теплоты от более нагретого тела. Если рабочие тела имеют одинаковую температуру, то осуществить процесс превращения теплоты в работу нельзя.

По этой причине все применяемые в технике машины-двигатели работают с использованием высокотемпературных процессов выделения теплоты (сжигания топлива, ядерных реакций), когда температура рабочего вещества значительно превышает температуру вещества-холодильника (например, охлаждающей воды).

Этим же обусловлены те трудности, которые не позволяют эффективно использовать в технике огромные запасы тепла воды морей и океанов ввиду отсутствия веществ-холодильников с достаточно низкой температурой.

Для математического выражения второго закона и удобства расчета тепловых процессов Клаузиус ввел в термодинамику новую условную величину, зависящую от отношения $Q/T$, названную им *энтропией*. Эта величина определяет тепловое состояние вещества и является его параметром, так же как давление, удельный объем, температура и др. Изменение энтропии определяется только начальным и конечным состоянием рабочего вещества и не зависит от протекания самого процесса. Энтропия обозначается буквой $S$ и имеет размерность:

для 1 *кг* вещества — *ккал/(кг·град)* или в единицах СИ *дж/(кг·град)*;

для 1 *кмоль* вещества — *ккал/(кмоль·град)* или в единицах СИ *дж/(кмоль·град)*.

Изменение энтропии в процессе подвода или отвода теплоты выражается следующей простой зависимостью:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q_{1,2}}{T_m}$$

где $S_1$ и $S$ — начальное и конечное значение энтропии;
$Q_{1,2}$ — количество переданной теплоты;
$T_m$ — средняя абсолютная температура процесса.

При замкнутых (круговых) процессах или циклах (см. стр. 58) одно тело всегда получает теплоту и его энтропия увеличивается, а второе тело отдает теплоту и его энтропия уменьшается. В полностью обратимых процессах, при которых вещество проходит все изменения своего состояния как в прямом, так и в обратном направлении, энтропия остается постоянной. Если же в изолированной системе протекает реально осуществляемый тепловой процесс, то энтропия системы возрастает. Это указывает на некоторое рассеяние теплоты в действительных процессах, что связано с их необратимостью.

**Энтропийная диаграмма** $S—T$. Тепловые процессы, происходящие при охлаждении и нагревании воздуха или других газов (паров), удобно изучать, пользуясь так называемой энтропийной диаграммой, по которой можно легко находить все основные величины, характеризующие тепловое состояние вещества. Эта диаграмма называется диаграммой $S—T$, так как по горизонтальной ее оси отложены значения энтропии $S$, а по вертикальной — абсолютные температуры $T$. Следовательно, диаграмма выражает зависимость между величинами $S$ и $T$ для данного газа. На рис. 2.5 (см. Приложение) представлена диаграмма $S—T$ для 1 *кг* воздуха.



При технических расчетах применяют также энтропийные диаграммы, составленные для 1 *моль* или *кмоль* газа*. Для пересчета *ккал/кг* в *ккал/кмоль* нужно умножить значение *ккал/кг* на молекулярный вес данного газа. При переводе значений энтропии из одних единиц в другие пользуются следующими соотношениями:

$$1\Delta i \text{ ккал/кг} = \frac{1}{\rho}\Delta i \text{ ккал/м}^3 = \frac{1}{M}\Delta i \text{ ккал/кмоль}$$

где $\rho$ — плотность газа при 0 °С и 760 *мм рт. ст.*, *кг/м*³;
$\Delta i$ — разность энтальпий, *ккал*;
$M$ — молекулярный вес газа, *кг/кмоль*.

При построении энтропийных диаграмм исследователи могут принимать разные начальные точки. Поэтому абсолютные значения энтропий (и энтальпий), определенные для одних и тех же состояний газа ($T$, $p$) по разным диаграммам, могут отличаться по величине. Однако для тепловых расчетов, например составления тепловых балансов установок и аппаратов, это не имеет значения, поскольку в баланс всегда входит разность энтропий (энтальпий), которая для одинаковых параметров газа получается одной и той же величины на любой диаграмме. Следует только потоки газа выражать в единицах, принятых в размерности для энтальпии, т. е. в *кг*, *м*³ или *кмоль*.

Горизонтальные прямые на диаграмме $S—T$ соответствуют процессам, протекающим при постоянной температуре. Такие процессы называются *изотермическими*, а линии, изображающие процессы на диаграмме,— *изотермами*.

Вертикальные прямые на диаграмме соответствуют обратимым процессам, протекающим при неизменной энтропии, когда теплота не подводится к телу и не отнимается от него; такие процессы называются *изоэнтропийными* или *адиабатическими*, а вертикальные линии на диаграмме — *адиабатами*.

Кривые линии, идущие на диаграмме сверху вниз, соответствуют процессам при постоянном давлении и называются *изобарами*. Кривые *постоянной энтальпии* (изоэнтальпы) показаны на диаграмме линиями, идущими слева направо, с некоторым уклоном вниз.

На нижней части диаграммы нанесены две кривые, соединяющиеся между собой в точке $K$. Кривая, расположенная слева от точки $K$, носит название *пограничной кривой жидкости* и образуется точками, соответствующими моментам полной конденсации пара в жидкость. Влево от этой кривой находится область жидкого воздуха, а вправо — область влажного пара воздуха.

Кривая, расположенная вправо от точки $K$, называется *пограничной кривой пара* и соответствует точкам превращения влажного пара в насыщенный и насыщенного пара в перегретый. Вправо от этой кривой находится область перегретого пара.

* *Моль* (грамм-моль) и *кмоль* (килограмм-моль) — количество вещества соответственно в граммах и килограммах, равное его молекулярному весу. Например, для кислорода 1 *моль* равен 32 *г*, а 1 *кмоль* — 32 *кг*. Для воздуха 1 *моль* равен 28,97 *г*, а 1 *кмоль* — 28,97 *кг* (~29 *кг*), для азота 1 *моль* равен 28,02 *г*, а 1 *кмоль* — 28,02 *кг* (~28 *кг*).

Отрезки между кривыми пара и жидкости, где линии постоянного давления имеют вид слегка наклонных прямых, выражают теплоту испарения (конденсации) воздуха при указанных абсолютных давлениях.

Точка $K$ представляет собой критическую точку для воздуха и соответствует критическому абсолютному давлению и критической температуре. В этой точке теплота испарения жидкого воздуха равна нулю.

Рассмотрим на нескольких примерах способ пользования диаграммой $S—T$.

**Пример 1.** Определить теплоту испарения воздуха при $P_а = 10$ *кгс/см²*.

Находят энтальпию насыщенного пара воздуха при 10 *кгс/см²*. Для этого из точки пересечения пограничной кривой пара и изобары для 10 *кгс/см²* (точка $A$ на диаграмме) проводят кривую, параллельную кривым постоянной энтальпии. В данном случае она совпадает с кривой, соответствующей значению энтальпии 72 *ккал/кг*. Энтальпию жидкого воздуха при 10 *кгс/см²* находят по точке $Б$, соответствующей пересечению изобары для 10 *кгс/см²* с пограничной кривой жидкости; она равна 35 *ккал/кг*. Следовательно, искомая теплота испарения

$$r = 72 - 35 = 37 \text{ ккал/кг}$$

**Пример 2.** Определить количество жидкости, получающейся при дросселировании воздуха с давления $p_а = 200$ *кгс/см²* до давления 10 *кгс/см²* при начальной температуре воздуха 137 °К (—136 °С).

Из диаграммы видно, что энтальпия воздуха до дросселирования равна 50 *ккал/кг* (точка $B$ на диаграмме). Процесс дросселирования протекает при постоянной энтальпии и заканчивается в точке $Г$, соответствующей точке пересечения кривой энтальпии 50 *ккал/кг* и изобары 10 *кгс/см²*. Доля сжиженного воздуха определяется как отношение длины отрезка $АГ$ к отрезку $АБ$, т. е. к скрытой теплоте испарения 1 *кг* воздуха. Измерив длины этих отрезков на диаграмме в миллиметрах, найдем, что количество получившейся жидкости равно:

$$\frac{\text{длина } АГ}{\text{длина } АБ} \cdot 100 = 59\%$$

**Пример 3.** Определить количество холода и конечную температуру воздуха, получаемую при адиабатическом расширении его с давления $p_а = 200$ *кгс/см²* до давления 10 *кгс/см²*; начальная температура + 30 °С.

Энтальпия воздуха в начальных условиях равна 115 *ккал/кг* (точка $Д$ на диаграмме). Конечное состояние находят, проводя вниз вертикальную прямую (адиабату) до пересечения ее с изобарой 10 *кгс/см²* в точке $Е$. Этой точке на диаграмме соответствуют температура 125 °К (—148 °С) и энтальпия 76,8 *ккал/кг*. Следовательно, полученное количество холода:

$$Q = 115 - 76{,}8 = 38{,}2 \text{ ккал/кг воздуха}$$

**Пример 4.** Определить энтальпию воздуха для следующих условий:

а) $T = 290$ °К; $p_а = 100$ *кгс/см²*. Проводя горизонталь через деление на оси ординат, соответствующее $T = 290$ °К, до пересечения с изобарой, соответствующей давлению 100 *кгс/см²*, получают точку искомой энтальпии, равной 114,5 *ккал/кг*;

б) $T = 108$ °К; $p_а = 10$ *кгс/см²*. Проводя горизонталь через $T = 108$ °К до пересечения с изобарой 10 *кгс/см²*, получают точку пересечения на правой пограничной кривой (кривая пара). Следовательно, воздух находится в состоянии насыщенного пара и его энтальпия равна 72 *ккал/кг*;

в) $T = 105$ °К; $p_а = 8$ *кгс/см²*. Точка пересечения горизонтали $T = 105$ °К с изобарой 8 *кгс/см²* лежит между пограничными кривыми пара и жидкости. Следовательно, воздух находится в состоянии влажного пара и его энтальпия равна 59 *ккал/кг*;

г) $T = 105$ °К; $p_а = 40$ *кгс/см²*. Продолжая горизонталь через $T = 105$ °К до изобары 40 *кгс/см²*, получают точку пересечения в области, лежащей слева от пограничной кривой жидкости. Следовательно, воздух будет в жидком состоянии и его энтальпия равна 34 *ккал/кг*.

**Пример 5.** Определить температуру конденсации воздуха при разных давлениях:

а) $p_а = 15$ *кгс/см²*. Из точки пересечения изобары, соответствующей давлению 15 *кгс/см²*, с пограничной кривой пара проводят горизонталь вправо на ось температур, на которой отсчитывают $T = 115$ °К. Это будет искомая температура конденсации;

б) $p_а = 60$ *кгс/см²*. Соответствующая этому давлению изобара лежит выше пограничной кривой и нигде не пересекается с нею, так как давление выше критического. Поэтому при всех давлениях, в том числе и при $p_а = 60$ *кгс/см²*, лежащих выше критической изобары, температура конденсации равна критической. Соответствующую этой температуре горизонтальную линию изобара $p_а = 60$ *кгс/см²* пересекает в области, лежащей слева от критической точки и пограничной кривой жидкости, т. е. в области полного сжижения. Выше этой температуры воздух будет находиться в виде газа при любом высоком давлении.

**Пример 6.** Определить количество теплоты, отнимаемое от 50 *кг* воздуха при его охлаждении в следующих условиях:

а) $p_а = 40$ *кгс/см²*; с температуры $T = 300$ °К до $T = 90$ °К. По диаграмме находят значение энтальпий для этих условий в точках пересечения изобары $p_а = 40$ *кгс/см²* с горизонтальными линиями (изотермами) для 300 и 90 °К.

При 40 *кгс/см²* и 300 °К $i_1 = 120{,}2$ *ккал/кг*

При 40 *кгс/см²* и 90 °К $i_2 = 27$ *ккал/кг*

Следовательно, искомое количество теплоты

$$Q = 50\,(120{,}2 - 27) = 4660 \text{ ккал}$$

б) $p_а = 15$ *кгс/см²*; с температуры $T = 270$ °К до температуры конденсации. Аналогично предыдущему находят значение энтальпии для 270 °К и 15 *кгс/см²*: $i_1 = 114$ *ккал/кг*. Точка пересечения изобары 15 *кгс/см²* с пограничной кривой пара соответствует энтальпии $i_2 = 71{,}5$ *ккал/кг*. Следовательно, искомое количество теплоты $Q = 50\ (114 - 71{,}5) = 2125$ *ккал*;

в) $p_а = 4$ *кгс/см²*; с температуры $T = 145$ °К до полного сжижения. Энтальпия газа для $p_а = 4$ *кгс/см²* и 145 °К : $i_1 = 84{,}1$ *ккал/кг*. Энтальпию жидкости при $p_а = 4$ *кгс/см²* находят в точке пересечения изобары 4 *кгс/см²* с левой пограничной кривой жидкости: $i_0 = 29$ *ккал/кг*. Искомое количество теплоты $Q = 50\ (84{,}1 - 29) = 2755$ *ккал*.

По диаграмме $S—T$ для 1 *кг* кислорода (рис. 2.6, см. Приложение) можно определить основные параметры состояния кислорода при различных температурах и абсолютных давлениях. Диаграммой можно пользоваться при расчете теплообменников и испарителей для газообразного и жидкого кислорода.

Когда агрегатное состояние газов не изменяется в течение всего процесса теплообмена, можно (учитывая, что объемные теплоемкости двухатомных газов — воздуха, кислорода, азота — равны) пользоваться тепловыми диаграммами для воздуха. При этом энтальпию следует брать в *ккал/м³* или *ккал/кмоль* и в соответствующих единицах (*м³* или *кмоль*) выражать количество газов. Если диаграмма для воздуха составлена в *ккал/кг*, то значения, взятые из диаграммы, следует умножить или на плотность воздуха при 0 °С и 760 *мм рт. ст.*, равную $\rho = 1{,}293$ *кг/м³*, или на молекулярный вес воздуха $M = 29$.

Если в балансе участвует поток, состоящий из двух или трех газов, отличающийся по составу от воздуха, то его энтальпию определяют по уравнению

$$i_{x,y,z} = xi_x + yi_y + zi_z$$

где $x$, $y$, $z$ — содержание отдельных газов в смеси;

$i_x$, $i_y$, $i_z$ — энтальпии соответствующих газов по диаграммам.

В этом случае диаграммы для отдельных газов, входящих в поток, должны быть приведены к одной условной начальной точке и общей размерности.

Для приведения диаграмм к одной условной начальной точке нужно сравнить энтальпии газов при одних и тех же давлении и температуре, найденные по разным диаграммам (например, при $p = 1$ *кгс/см²* (абс.) и $T = 300$ °К). Затем выбирают диаграмму, к которой приводят остальные, и в значения энтальпий, снятых с других диаграмм, вносят поправки, равные разности энтальпий в точке сравнения. Так же поступают и в том случае, когда требуется найти абсолютные значения энтальпии из разных диаграмм.

## 2.3. ПОНИЖЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВ ПРИ РАСШИРЕНИИ

При расширении сжатого газа, как правило, понижается его температура. Расширение газа можно осуществить двумя путями: а) без отдачи внешней работы — дросселированием, т. е. пропусканием сжатого газа через отверстие вентиля; б) с отдачей внешней работы — расширением газа в цилиндре поршневого двигателя (детандера) или в каналах направляющего аппарата и лопатках рабочего колеса турбины (турбодетандера). Рассмотрим эти процессы.

**Понижение температуры газа при расширении без отдачи внешней работы.** Приведенное выше уравнение Клапейрона ($pv = RT$) справедливо только для идеальных газов, не существующих в природе. Объем реальных газов, особенно в условиях высокого давления и низкой температуры, уменьшается при сжатии больше или меньше, чем это следует из уравнения Клапейрона.

Уравнение Клапейрона для 1 *кг* реального газа имеет следующий вид:

$$pv = ZRT \qquad (2.9)$$

где $Z$ — коэффициент сжимаемости.

Зная коэффициент сжимаемости данного реального газа, можно по уравнению Клапейрона для идеального газа определить изменение давления или объема реального газа. Кривые, по которым можно определить коэффициенты сжимаемости для некоторых газов при разных абсолютных давлениях и температурах (0; 25 и 50 °С) приведены на рис. 2.7. Если коэффициент сжимаемости при данной температуре и давлении меньше единицы, такой газ сжимается в бо́льшей степени, чем идеальный газ; наоборот, если $Z > 1$, газ сжимается в меньшей степени, чем это следует из уравнения Клапейрона. Для идеального газа коэффициент сжимаемости $Z = 1$.



При высоких давлениях значительно отличающаяся (от идеального газа) сжимаемость характерна для криптона и ксенона, что следует учитывать при определении количества этих газов в баллоне.

В момент дросселирования газа (при прохождении его через вентиль-дроссель) давление понижается и газ расширяется. Температура идеального газа остается постоянной, но для всех реальных газов при дросселировании температура изменяется. Данное явление обусловлено присущей реальным газам бо́льшей или меньшей сжимаемости по сравнению с идеальным газом. Оно было впервые установлено английскими учеными Джоулем и Томсоном (Кельвином) в 1852 г. и с тех пор известно в физике под названием *эффекта Джоуля—Томсона*.

При дросселировании реальный газ совершает два вида работы — внешнюю и внутреннюю. Внешняя работа заключается в перемещении некоторого объема газа при том давлении, которое действует после дросселя, а внутренняя — в преодолении сил взаимного притяжения между молекулами газа в процессе его расширения.

Внешняя работа может быть как положительной, так и отрицательной. Если реальный газ сжимается сильнее, чем это следует по уравнению Клапейрона, внешняя работа будет положительной. Она производится за счет части внутренней энергии газа, вследствие чего его температура понижается, т. е. газ охлаждается. Когда реальный газ сжимается в меньшей степени, чем следует по уравнению Клапейрона, внешняя работа отрицательна. В этом случае для ее производства используется часть работы компрессора, и газ после дросселя нагревается, так как эта избыточная работа идет на увеличение внутренней энергии газа.

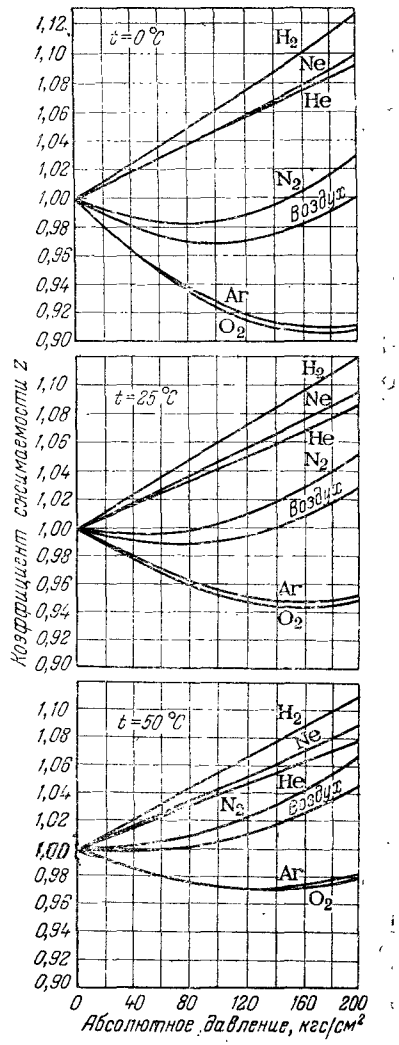



Рис. 2.7. Коэффициенты сжимаемости реальных газов при разных абсолютных давлениях и температурах.

Внутренняя работа, производимая газом при дросселировании, всегда положительна, т. е. вызывает охлаждение газа.

Приводим значения коэффициента сжимаемости для криптона и ксенона (по данным Л. И. Казарновской и М. М. Александровой):

| Абсолютное давление, *кгс/см²* | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| при 17 °С (290 °К) | | | | | | | | |
| криптон | 0,95* | 0,91* | 0,86 | 0,82 | 0,78 | 0,74 | 0,72 | 0,66 |
| при 27 °С (300 °К) | | | | | | | | |
| криптон | 0,96 | 0,92 | 0,88 | 0,84 | 0,81 | 0,78 | 0,75 | 0,74 |
| ксенон | 0,89 | 0,75 | 0,54 | 0,28 | 0,30 | 0,34 | 0,38 | 0,43 |
| при 47 °С (320 °К) | | | | | | | | |
| криптон | 0,97 | 0,94 | 0,91 | 0,88 | 0,85 | 0,83 | 0,81 | 0,88 |
| ксенон | 0,91 | 0,80 | 0,68 | 0,53 | 0,40 | 0,39 | 0,42 | 0,45 |

* Для ксенона коэффициенты сжимаемости при давлении 20 и 40 *кгс/см²* составляют соответственно 0,87 и 0,70.

Общий эффект дросселирования для каждого реального газа определяется соотношением внешней и внутренней работы и зависит от начальных условий дросселирования (начального давления и температуры газа), а также физической природы газа.

Внешняя работа для воздуха, кислорода, азота в областях давлений и температур, обычных при их дросселировании в установках глубокого холода, положительна и по своей абсолютной величине незначительна по сравнению с внутренней работой. Поэтому эти газы при дросселировании всегда охлаждаются.

Однако существуют условия, когда и эти газы при дросселировании могут не охлаждаться, а наоборот, нагреваться. Например, Фогель установил, что при начальной температуре +10 °С процессы дросселирования воздуха с давления свыше $p_a$=368 *кгс/см²* и кислорода с давления свыше $p_a$=311 *кгс/см²*, сопровождаются нагреванием этих газов. В указанных условиях внешняя работа дросселирования этих газов становится отрицательной, а ее абсолютная величина возрастает.

Физическая природа водорода и гелия такова, что силы взаимного притяжения между их молекулами незначительны. Поэтому внутренняя работа дросселирования водорода и гелия, затрачиваемая на преодоление межмолекулярных сил сцепления, очень мала по сравнению с внешней работой. Кроме того, водород и гелий при компримировании (сжатии) сжимаются в меньшей степени, чем это следует из уравнения Клапейрона. Вследствие этих свойств внешняя работа, совершаемая водородом при дросселировании, отрицательна и при начальной температуре выше —80 °С превышает внутреннюю. В этих условиях водород при дросселировании всегда нагревается.

Указанное соотношение между внутренней и внешней работой изменяется при начальной температуре водорода ниже —80 °С. Силы взаимодействия между частицами водорода с понижением температуры возрастают, вследствие чего внутренняя работа увеличивается; когда внутренняя работа становится больше внешней, водород с начальной температурой ниже —80 °С при дросселировании начнет охлаждаться. Подобное явление происходит и с гелием, у которого предельная температура, ниже которой он при дросселировании охлаждается, еще более низкая и равна —234 °С (39,15 °К).



В термодинамике низких температур различают *дифференциальный, интегральный и охлаждающий* эффекты Джоуля—Томсона.

Дифференциальный эффект ($\alpha_i$) — отношение бесконечно малого изменения температуры дросселируемого газа к бесконечно малому уменьшению давления, вызывающему это изменение температуры.

Интегральный эффект показывает суммарное изменение температуры при конечном перепаде давлений, т. е. $\Delta T_i = T_1 - T_2$.

Охлаждающий (называемый также *изотермическим*) эффект дросселирования ($\Delta i_T$) показывает количество холода в *ккал*, полученного на 1 *кг* воздуха, расширившегося в дросселе с начального до конечного давления.

Между охлаждающим — изотермическим ($\Delta i_T$) и интегральным ($\Delta T_i$) эффектами Джоуля—Томсона существует следующая зависимость:

$$\Delta i_T = C_p \Delta T_i \qquad (2.10)$$

где $C_p$ — средняя теплоемкость газа в пределах интервала температур при дросселировании, *ккал/(кг·град)*.

Так как энтальпия газа в процессе дросселирования остается постоянной, то на диаграмме $S$—$T$ этот процесс изображается линиями постоянных энтальпий ($i$=const). Уменьшение энтальпии газа всегда происходит до начала дросселирования, т. е. в процессе сжатия газа в компрессоре до величины давления перед дросселем. При этом затрачиваемая на сжатие механическая работа переходит в теплоту сжатия, которая отводится от газа водой в холодильнике компрессора. Расширившийся в дросселе газ вследствие этого имеет меньшую энтальпию и его температура после расширения будет ниже начальной на величину интегрального эффекта Джоуля—Томсона.

Величину дифференциального эффекта Джоуля — Томсона можно определить по формуле Ноэлля

$$\alpha_i = (a - bp)\left(\frac{273}{T}\right)^2 \qquad (2.11)$$

где $T$ — начальная температура в °К;

$p$ — начальное абсолютное давление дросселирования.

Опытами Фогеля установлены значения коэффициентов $a$ и $b$.

Для воздуха $a$ = 0,268; $b$ = 0,00086; для кислорода $a$ = 0,313; $b$ = 0,00085.

Если, например, абсолютное давление $p$ = 200 *кгс/см²*, $T$ = 283 °К, то для воздуха

$$\alpha_i = (0{,}268 - 0{,}00086 \cdot 200)\left(\frac{273}{283}\right)^2 \approx 0{,}09\ ^\circ\text{C на 1 кгс/см}^2$$

Из формулы (2.11) следует, что с увеличением начального давления величина $\alpha_i$ будет уменьшаться и при $a=bp$ станет равной нулю, т. е. температура воздуха при дросселировании понижаться не будет. Дальнейшее увеличение давления приводит к тому, что величина эффекта Джоуля — Томсона становится отрицательной и газ при дросселировании будет нагреваться. Точка, в которой $\alpha_i = 0$, называется *точкой инверсии*. По данным Фогеля, это произойдет при абсолютном давлении:

для воздуха $$p_{инв} = \frac{0{,}268}{0{,}00086} = 311 \ кгс/см^2$$

для кислорода $$p_{инв} = \frac{0{,}313}{0{,}00085} = 368 \ кгс/см^2$$

Следовательно, при дросселировании с более высоких начальных давлений, чем указанные, воздух и кислород нагреваются.

Гаузеном установлено, что величина дифференциального эффекта Джоуля—Томсона зависит от изменения температуры. Опыты Гаузена показали также, что воздух в области низких температур и давлений имеет вторую точку инверсии. Поэтому величину

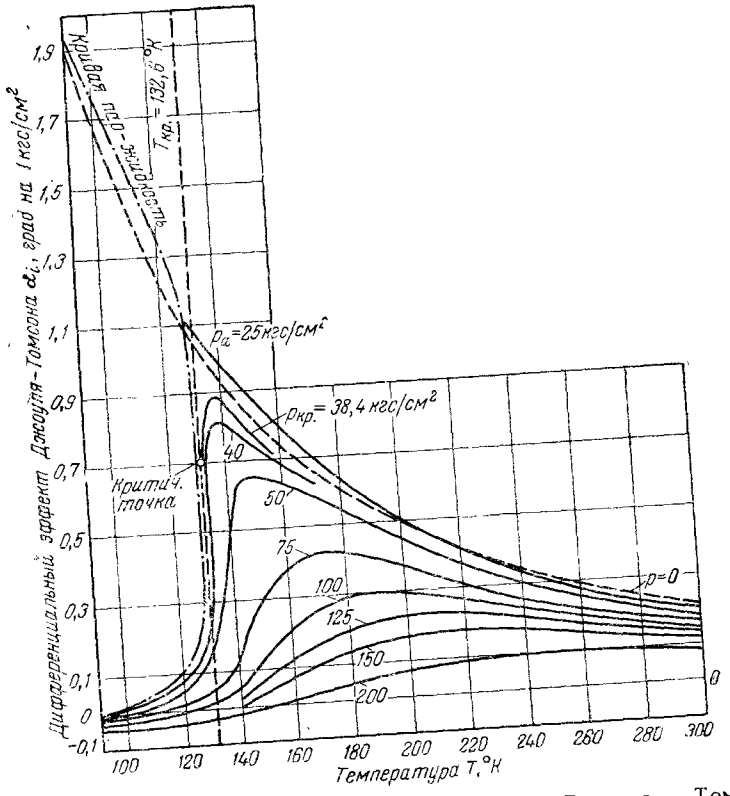



Рис. 2.8. Значения дифференциального эффекта Джоуля — Томсона для воздуха при разных температурах и абсолютных давлениях.



дифференциального эффекта Джоуля—Томсона при расчетах находят по специальной диаграмме (рис. 2.8).

Сплошные линии на диаграмме рис. 2.8 соответствуют кривым постоянного абсолютного давления (изобары). Кривая насыщения показана слева пунктиром с точкой. Верхняя ее часть от критической точки относится к сухому насыщенному пару, а нижняя — к жидкости.

Вертикальная линия, проходящая через критическую точку, является критической изотермой, соответствующей $T_{кр}=132{,}6$ °К. Влево от нее и ниже нижней кривой насыщения воздух находится в жидком состоянии. В области давлений меньше критического эффект Джоуля—Томсона с понижением температуры увеличивается до линии насыщения. При давлениях выше критического этот эффект с понижением температуры сначала возрастает до максимума, а затем уменьшается, и тем более резко, чем ближе давление к критическому.

Дифференциальный эффект Джоуля—Томсона при высоких давлениях и низких температурах отрицательный. Точки пересечения изобар с горизонталью 0—0 являются инверсионными, так как в них $\alpha_i=0$. Как видно из рис. 2.8, изобары в правой части также где-то пересекаются с горизонталью 0—0; это соответствует вторым инверсионным точкам для воздуха в области очень высоких температур. Между двумя инверсионными точками значение дифференциального эффекта Джоуля—Томсона для воздуха всегда положительно.

На основе данных о величине интегрального эффекта Джоуля—Томсона, вычисленной для разных начальных давлений и температур дросселирования, построена диаграмма $T$—$i$ для 1 *кг* воздуха (рис. 2.9, см. Приложение). По этой диаграмме можно определить многие важные величины. На горизонтальной оси диаграммы отложены абсолютные температуры $T$ в °К, а на вертикальной оси — значения энтальпии $i$ в *ккал/кг*. Кривые на диаграмме — это линии постоянных давлений (изобары). Точка $A$ на диаграмме соответствует критической точке и отделяет пограничную кривую сухого насыщенного пара (верхняя) от пограничной кривой жидкости (нижняя). Процесс дросселирования, при котором энтальпия газа остается постоянной ($i=\text{const}$), изображен горизонтальной прямой, параллельной оси $T$. Область жидкого воздуха на диаграмме находится слева от вертикали, проведенной через точку $A$ (критическая изотерма $T_{кр}=\text{const}$), и ниже пограничной линии жидкости*.

Поясним на примерах, как производить расчеты по диаграмме $T$—$i$ (рис. 2.10).

---

* Значения $T$ иногда откладывают по вертикальной оси, а значения $i$ — по горизонтальной; в этом случае изобары для более низких давлений находятся на диаграмме внизу, а для более высоких — вверху; в области же насыщения изобары располагаются горизонтально.

Диаграмму $T$ — $i$ можно построить также для 1 *кмоль* газа.

**Пример 1**. Определить интегральный эффект Джоуля — Томсона при расширении воздуха с абсолютного давления 200 *кгс/см²* до 0 *кгс/см²* при начальной температуре $T_1 = 300$ °К (27 °С).

Из точки *1* проводят горизонтальную прямую до пересечения в точке *2* с изобарой $p = 0$. Опустив на горизонтальную ось перпендикуляр из точки *2*, получают конечную температуру $T_2 = 265$ °К. Следовательно, охлаждение произошло на величину $\Delta T = T_1 - T_2 = 300 - 265 = 35°$. С понижением начальной температуры, как это следует из диаграммы, величина $\Delta T$ для тех же перепадов давления увеличивается.

**Пример 2**. Для тех же значений найти охлаждающий (изотермический) эффект дросселирования, т. е. количество холода, получаемого при расширении 1 *кг* воздуха.

Из точки *1* проводят вертикаль до пересечения с линией $p = 0$ в точке *3*. Дросселированный воздух имеет температуру $T_2 < T_1$ и для нагревания до температуры сжатого воздуха $T_1$ по линии $p = 0$ он должен поглотить количество теплоты, равное разности энтальпий в точках *3* и *1*. Это количество теплоты получается за счет внутренней энергии газа и является ни чем иным, как холодопроизводительностью процесса дросселирования. Следовательно

$$\Delta i_T = i_3 - i_1 = 122{,}2 - 113{,}9 = 8{,}3 \text{ ккал/кг } (34{,}8 \text{ кдж/кг})$$

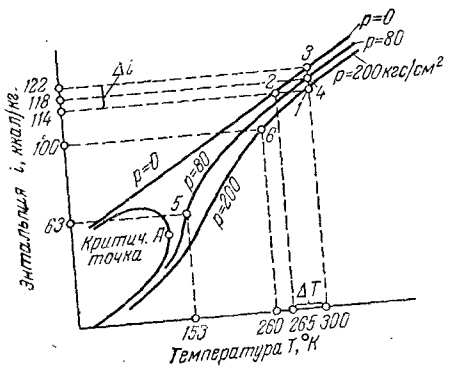



Рис. 2.10. Схема пользования диаграммой $T - i$.

Значения $i_3 = 122{,}2$ *ккал/кг* и $i_1 = 113{,}9$ *ккал/кг* определяются по делениям шкалы на вертикальной оси диаграммы, соответствующим точкам *1* и *3* на кривых $p = 0$ и $p = 200$ *кгс/см²*.

**Пример 3**. Определить количество теплоты, отдаваемое в теплообменнике 1 *кг* воздуха при абсолютном давлении 80 *кгс/см²* и охлаждении с 27 до —120 °С.

По диаграмме $T - i$ находят энтальпию воздуха в точках *4* и *5*, а именно $i_4 = 118$ *ккал/кг*; $i_5 = 63$ *ккал/кг*. Искомое количество теплоты равно:

$$\Delta i = i_4 - i_5 = 118 - 63 = 55 \text{ ккал/кг}$$

**Пример 4**. Определить среднюю теплоемкость воздуха при $p_a = 200$ *кгс/см²* в пределах температур 300 и 260 °К.

Средняя теплоемкость определяется из уравнения

$$\Delta i = C_p (T_1 - T_2)$$

откуда

$$C_p = \frac{\Delta i}{T_1 - T_2} \text{ ккал/(кг·град)}$$

$$T_1 - T_2 = 300 - 260 = 40 \text{ град}$$

По диаграмме $i_1 = 113{,}9$ *ккал/кг* и $i_6 = 100$ *ккал/кг*. Следовательно

$$C_p = \frac{i_1 - i_6}{T_1 - T_2} = \frac{113{,}9 - 100}{300 - 260} = 0{,}348 \text{ ккал/(кг·град)} \ [1{,}46 \text{ кдж/(кг·град)}]$$



Из диаграммы $T—i$ видно, что постепенное понижение начальной температуры воздуха при дросселировании приводит газ в конце расширения в область, где он превращается в сухой насыщенный пар, а при дальнейшем охлаждении и отнятии теплоты конденсации переходит в жидкость. Это происходит в условиях, соответствующих на диаграмме точкам пересечения горизонталей с пограничными кривыми пара.

Очень низкую температуру, необходимую для начала сжижения воздуха, достигают в противоточных теплообменниках. Теплообменник служит для понижения температуры сжатого воздуха перед его расширением путем охлаждения обратным газом, уже охлажденным до этого в процессе дросселирования.

По диаграмме $T—i$ можно установить, что если воздух перед расширением имеет, например, температуру 15 °С, то при расширении от абсолютного давления 200 до 1 *кгс/см²* температура понизится всего на 39 °С. После предварительного охлаждения воздуха до —50 °С можно, после расширения с 200 до 1 *кгс/см²*, достичь температуры —121,5 °С. Противоточный теплообменник и служит для предварительного охлаждения дросселируемого воздуха.

Теплообменник не производит холода. Он только накапливает холод в кислородном аппарате — является «барьером», препятствующим уносу этого холода обратным потоком газа из аппарата. Без теплообменника невозможно было бы охладить воздух до температуры, необходимой для его сжижения при данном давлении.

На основе эффекта Джоуля—Томсона разработан ряд холодильных циклов получения жидкого воздуха в установках разделения воздуха.

**Понижение температуры газа при расширении с отдачей внешней работы.** При расширении газа с отдачей внешней работы (выражающейся в перемещении поршня или вращении рабочего колеса турбины) температура газа понижается значительно. Доказано, что наибольшее охлаждение газа происходит тогда, когда процесс осуществляется адиабатически, т. е. без подвода и отнятия теплоты от рабочего газа. На диаграмме $S—T$ такой процесс изображен вертикальной линией, так как энтропия при этом остается постоянной. В реальных условиях адиабатический процесс осуществить нельзя, поскольку неизбежен теплообмен газа со стенками рабочей машины, в которой происходит расширение газа. Чем ближе действительный процесс расширения газа к адиабатическому, тем выше охлаждающий эффект.

Для адиабатического расширения идеального газа абсолютные температуры и давления в начале и конце расширения газа связаны следующим соотношением:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad (2.12)$$

где $p_1$ и $T_1$ — начальные давление и температура;
$p_2$ и $T_2$ — конечные давление и температура;
$k$ — показатель кривой (адиабаты) расширения, равный отношению теплоемкостей газа $k = C_p/C_v$; для воздуха $k = 1{,}4$.

**Пример**. Пусть для воздуха $p_2 = 1$ *кгс/см²*; $p_1 = 80$ *кгс/см²* и $T = 293$ °К (20 °С), тогда температура в конце расширения

$$T_2 = 293\left(\frac{1}{80}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 84\,°\text{К}\,(-189\,°\text{С})$$

В приведенном примере температура $T_2$ близка к температуре сжижения воздуха при $p_a = 1$ *кгс/см²* (около —193 °С), и поэтому при более высоком начальном давлении $p_1$ часть воздуха в конце расширения теоретически может переходить в жидкость. Таким образом, данный процесс является эффективным способом охлаждения газа и используется в тех случаях, когда основную часть продуктов разделения воздуха требуется получать в жидком виде (жидкий кислород, жидкий азот) или для покрытия значительных холодопотерь в окружающую среду.

В процессе расширения с отдачей внешней работы реальные газы всегда понижают свою температуру. Действительный охлаждающий эффект расширения реального газа как при низких, так и высоких начальных температурах получается обычно несколько бóльшим, чем для идеального газа. Однако вблизи критической точки охлаждающий эффект быстро уменьшается с понижением температуры и увеличением давления и становится значительно ниже, чем для идеального газа. Рассмотрим физическую сущность данного процесса.

При любом расширении реальный газ должен производить следующие виды работы:

1) для преодоления внутренних сил притяжения между молекулами газа;

2) работу для преодоления внешнего сопротивления увеличению объема газа при расширении;

3) внешнюю работу за счет изменения давления газа при расширении.

При дросселировании энергия газа расходуется только на первый и второй виды работы, поэтому степень охлаждения газа незначительна; третий вид работы также производится газом, но это не влияет на понижение его температуры, так как работа затрачивается на преодоление трения при прохождении газа через дроссель и расходуемая внутренняя тепловая энергия газа возмещается возникающей теплотой трения.

Иными являются условия при адиабатическом расширении газа в поршневом детандере или в турбодетандере. В этом случае третий вид работы отдается наружу как внешняя работа расширения, а затрачиваемая на нее внутренняя теплота газа не возмещается поступлением ее извне. Поэтому при расширении с отдачей внешней работы газ охлаждается значительно сильнее, чем



при дросселировании, так как его внутренняя энергия расходуется на все три вида работы.

Работа адиабатического расширения газа, соответствующая холодопроизводительности процесса, состоит из двух частей. Первая часть — это работа за счет использования внутренних межмолекулярных сил газа; она проявляется в охлаждающем эффекте Джоуля—Томсона и выражается разностью энтальпий воздуха при давлениях $p_1$ и $p_2$ и температуре $T_1$ (рис. 2.11).

Вторая часть — это внешняя работа детандера вследствие расширения в нем газа; ее эффект охлаждения выражается уменьшением энтальпии 1 *кг* газа при адиабатическом расширении в детандере с давления $p_2$ и температуры $T_2'$ до давления $p_1$ и температуры $T_2$ по линии *3—4*, как это изображено на рис. 2.11. Разность энтальпий $Q_1 = i_1 - i_2$ выражает холодопроизводительность процесса дросселирования, а разность энтальпий $Q_2 = i_3 - i_4$ — холодопроизводительность процесса адиабатического расширения в детандере. Общая холодопроизводительность процесса с детандером $Q = Q_1 + Q_2$.

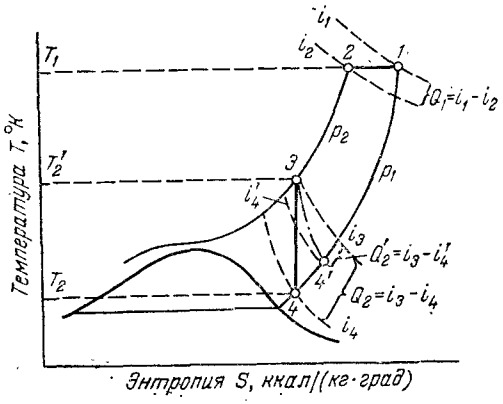



Рис. 2.11. Схема определения холодопроизводительности процесса с детандером по диаграмме $S - T$.

В действительности чисто адиабатический процесс расширения в детандере не протекает, так как невозможно полностью исключить теплообмен между газом и стенками, трение и т. п. Поэтому расширение происходит фактически не по адиабате *3—4*, а по какой-то кривой *3—4'* (политропе), и теплоперепад в детандере будет не $Q_2$, а $Q'_2 = i_3 - i'_4$, причем $Q'_2 < Q_2$, т. е. в детандере получается меньше холода, чем при адиабатическом процессе. Вследствие этого температура в конце расширения газа в детандере выше, чем при адиабатическом расширении (см. рис. 2.11).

Отношение $\eta_{ад} = Q'_1/Q_2$ называется *адиабатическим к. п. д. детандера* и показывает степень совершенства его работы, т. е. насколько действительный процесс расширения газа в детандере приближается к адиабатическому.

Для адиабатического процесса расширения газа величина к.п.д. равна 1, т. е. $\eta_{ад} = 1$.

## 2.4. ХОЛОДИЛЬНЫЕ ЦИКЛЫ

Для охлаждения и сжижения газов в технике используют холодильные циклы. Холодильным циклом называется *замкнутый процесс последовательного сжатия и расширения газа, сопровождающийся его нагреванием и охлаждением.* На сжатие газа затрачивается внешняя механическая работа, которая частично отдается обратно при расширении газа. Во всяком холодильном цикле затрачиваемая работа всегда больше получаемой, так как отнятие теплоты от охлаждаемого тела происходит на более низком температурном уровне, чем передача ее другому телу, являющемуся охладителем (согласно второму закону термодинамики).

Перенос теплоты с одного температурного уровня на другой, более высокий, осуществляется с помощью какого-либо рабочего газа. В циклах сжижения воздуха таким рабочим газом (хладоагентом) обычно является тот же воздух. В качестве вспомогательных хладоагентов применяются иногда аммиак или фреон.

В холодильном цикле работа расходуется на сжатие хладоагента в компрессоре. Холодильный цикл замкнут, если начальное и конечное состояния газа в нем совпадают. Для этого отдельные процессы, из которых составляется цикл, должны протекать в определенном порядке. Например, после сжатия газа (в компрессоре) и охлаждения (в водяном холодильнике) должно происходить расширение газа, сопровождающееся понижением его температуры, а затем нагревание газа до первоначальной температуры (в теплообменнике) при постоянном давлении.

### 2.4.1. Идеальный холодильный цикл

В идеальном холодильном цикле нет потерь теплоты, поэтому расход энергии на сжижение 1 *кг* воздуха будет наименьшим. Такой цикл можно представить себе лишь теоретически, так как практически его осуществить нельзя.

Идеальный холодильный цикл сжижения воздуха показан схематически на диаграмме *S—T* (рис. 2.12). Сжатие воздуха при постоянной температуре (изотермически) происходит по линии *1—3*; выделяющаяся при этом теплота, которая соответствует затрате работы на сжатие воздуха в компрессоре, передается воде холодильников. Затем воздух адиабатически, т. е. без отвода и притока к нему теплоты (энтропия остается постоянной), расширяется по линии *3—0*, совершая внешнюю работу. При этом температура воздуха понижается до $T_2$ и весь воздух переходит в жидкое состояние, так как точка *0* лежит влево от критической точки на пограничной кривой жидкости и соответствует состоянию полного сжижения воздуха. Затем идет обратный процесс нагревания воздуха в испарителе по линии *0—2* и далее в теплообменнике по линии *2—1* до первоначальной температуры $T_1$. Процесс



по линии *0—2—1* протекает при постоянном давлении, равном конечному давлению, достигнутому при расширении воздуха по линии *3—0*. Сжижаемый воздух идет навстречу рабочему воздуху (хладоагенту) теоретически при таком же низком давлении и охлаждается сначала в теплообменнике по линии *1—2* до температуры $T_2$, а затем при том же давлении полностью сжижается по линии *2—0* в ожижителе. Количества охлаждаемого и охлаждающего воздуха равны.

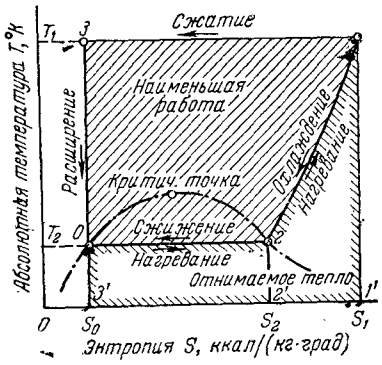



Рис. 2.12. Идеальный холодильный цикл сжижения воздуха на диаграмме *S — T*.

Количество теплоты, отнимаемой от охлаждаемого воздуха, выражено на рис. 2.12 площадью *1—2—0—3′—1′—1* и равно $Q_2 = i_1 - i_0$, где $i_1$ и $i_0$ — энтальпии воздуха в точках *1* и *0*. Наименьшая работа, затраченная в данном цикле, выражается площадью *1—3—0—2—1* и равна

$$AL_{мин} = T_1 (S_1 - S_0) - (i_1 - i_0)$$

Если, например, $T_1 = 300$ °K и абсолютное давление $p_1 = 1$ *кгс/см²*, то по диаграмме *S—T* (см. рис. 2.5 в Приложении) имеем:

$$i_1 = 122{,}2 \text{ ккал/кг}; \quad i_0 = 22 \text{ ккал/кг}; \quad S_0 = 0;$$
$$S_1 = 0{,}905 \text{ ккал/град}$$

Тогда

$$AL_{мин} = 300\,(0{,}905 - 0) - (122{,}2 - 22) = 171{,}3 \text{ ккал/кг } (717{,}1 \text{ кдж/кг})$$

Так как 1 *квт·ч* = 860 *ккал* = 3600 *кдж*, то

$$\frac{171{,}3}{860} = \frac{717{,}1}{3600} \approx 0{,}2 \text{ квт·ч/кг}$$

Это будет та наименьшая работа, которая необходима для сжижения 1 *кг* воздуха при начальной температуре 300 °K.

Действительный расход энергии на сжижение воздуха значительно выше теоретического вследствие того, что реальные процессы протекают необратимо, т. е. сопровождаются увеличением энтропий участвующих в процессе веществ. Потери энергии в реальных процессах слагаются из потерь: при дросселировании, потерь в окружающую среду, на неполный теплообмен вследствие разности температур между входящим в теплообменник и уходящим из него газом и др. Чем меньше эти потери, тем меньше необратимость процесса и расход энергии на сжижение газа, т. е. тем экономичнее процесс.

Осуществить идеальный цикл практически невозможно еще и потому, что воздух пришлось бы сжимать до очень высоких дав-

лений для того, чтобы при адиабатическом расширении по линии *3—0* попасть в точку *0*, лежащую на пограничной кривой жидкости. В этом легко убедиться по той же диаграмме *S—T*, если провести вертикаль из точки *0* вверх до пересечения с горизонталью $T_1=300$ °К. Точка *3* оказывается далеко влево за пределами диаграммы. Расчет показывает, что в этом случае соответствующее точке *3* абсолютное давление равнялось бы 400 000—500 000 *кгс/см*².

### 2.4.2. Холодильный цикл с дросселированием воздуха

Схема холодильного цикла с дросселированием и его изображение на диаграмме *S—T* показаны на рис. 2.13. Воздух сжимается компрессором *1* и проходит через холодильник *2* с проточной

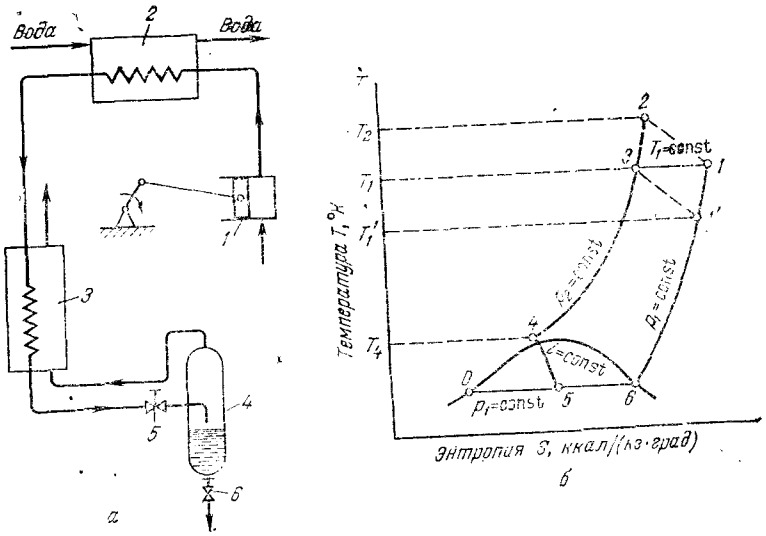



Рис. 2.13. Холодильный цикл с дросселированием:
*а* — схема цикла; *б* — цикл с дросселированием на диаграмме *S — T*; *1* — компрессор; *2* — холодильник; *3* — теплообменник; *4* — ожижитель; *5* — дроссельный вентиль; *6* — вентиль для слива жидкого воздуха.

водой (см. рис. 2.13, *а*). Затем сжатый воздух направляется в трубки противоточного теплообменника *3*, где происходит его дальнейшее охлаждение обратным потоком холодного газа из ожижителя *4*. Охлажденный сжатый воздух расширяется в дроссельном вентиле *5*; при этом он дополнительно охлаждается, частично сжижается и собирается в ожижителе *4*. Остальная часть воздуха, оставшаяся в газообразном состоянии, но имеющая очень низкую температуру, проходит между трубками теплообменника *3*, охлаждая поступающий по трубкам сжатый воздух и сама нагреваясь. При пуске в работу холодильной установки охлаждение воздуха до температуры, соответствующей началу его сжижения, происходит не сразу, а постепенно.



Схематическое изображение постепенного процесса охлаждения воздуха на диаграмме *S—T* представлено на рис. 2.14. Сжатый по изотерме *AB* воздух охлаждается при дросселировании по линии *B—1*, понижая температуру на величину $\Delta T_1$. Этот холодный воздух, проходя через теплообменник, понижает температуру поступающего навстречу сжатого воздуха на $\Delta T_1'$. Величина $\Delta T_1'$ всегда меньше $\Delta T_1$, так как теплоемкость сжатого воздуха больше, чем теплоемкость воздуха обратного потока с более низким давлением. Охлажденный на величину $\Delta T_1'$ сжатый воздух из точки *1* дросселируется по линии *1—2* с понижением температуры на $\Delta T_2$. Проходя по теплообменнику в обратном направлении, воздух понизит на $\Delta T_2'$ температуру сжатого воздуха, который расширяется по линии *II—3* с дальнейшим понижением температуры на $\Delta T_3$, и т. д. Постепенно сжатый воздух охладится в точке *VIII* до температуры, близкой к температуре его сжижения при атмосферном давлении, и затем в процессе дросселирования по линии *VIII—9* почти полностью превратится в жидкость в точке *9*. Отношение длин отрезков *9—C/0—C*, измеренных по диаграмме *S—T*, выражает количество сжижившегося воздуха в долях массы.

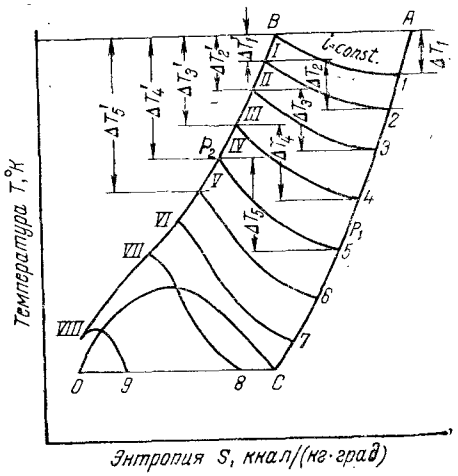



Рис. 2.14. Изображение на диаграмме *S — T* постепенного охлаждения воздуха в простом цикле с дросселированием.

Рассмотрим более детально по диаграмме *S—T* (см. рис. 2.13, *б*) установившийся процесс с дросселированием. Сжатие воздуха в компрессоре с давления $p_1$ до давления $p_2$ происходит по линии *1—2*. Теплота сжатия, соответствующая разности энтальпий воздуха в точках *2* и *3*, передается воде холодильников компрессора. Принимается, что воздух после холодильника имеет ту же температуру, что и до сжатия в точке *1*, поэтому можно считать, что сжатие воздуха происходит по изотерме *1—2*, т. е. $T_3=T_1$. Из точки *3* воздух, сжатый до давления $p_2$, проходит теплообменник, где его температура при постоянном давлении $p_2$=const понижается до $T_4$. Этот процесс протекает по изобаре *3—4*. С давлением $p_2$ и температурой $T_4$ воздух поступает к дроссельному вентилю. Про-

цесс дросселирования происходит, как указывалось, при постоянной энтальпии, т. е. по линии *4—5*, на которой $i=\text{const}$. Дросселирование заканчивается в точке *5*, лежащей на линии *0—6*, соответствующей давлению жидкости $p_1=\text{const}$. Отрезок *5—6* дает возможность определить количество жидкости, в процентах от массы перерабатываемого воздуха, как отношение: $\frac{5-6}{0-6}\cdot 100$.

Изобара *6—1* соответствует процессу нагревания в теплообменнике воздуха, уходящего из установки.

Составим тепловой баланс цикла с дросселированием для 1 *кг* воздуха, предположив, что потери холода отсутствуют. Обозначим:

$x$ — доля сжиженного воздуха;

$i_0$ — энтальпия жидкого воздуха, *ккал/кг*;

$i_1$ и $i_2$ — энтальпии воздуха при абсолютном давлении $p_1$ и $p_2$, *ккал/кг*.

При установившемся процессе и отсутствии потерь в систему вносится теплота $Q_1=i_3$, а отводится $Q_2=xi_0+(1-x)i_1$ *ккал/кг* воздуха. Так как при отсутствии потерь $Q_1=Q_2$, то

$$i_3=xi_0+(1-x)i_1$$

где $xi_0$ — количество теплоты, отводимое с жидким воздухом;
$(1-x)i_1$ — количество теплоты, отводимое с уходящей через теплообменник несжиженной частью воздуха, нагретой до температуры $T_1$ при абсолютном давлении $p_1$ и имеющей энтальпию $i_1$.

Из приведенного уравнения следует:

$$i_1-i_3=x(i_1-i_0)=\Delta i_T \qquad (2.13)$$

где величина $\Delta i_T$ — охлаждающий эффект Джоуля — Томсона.

В данном случае $\Delta i_T$ выражает и холодопроизводительность процесса на 1 *кг* дросселируемого воздуха, поскольку она равна количеству калорий, выводимых из установки с $x$ *кг* жидкого воздуха. Величина $i_1-i_0$ представляет собой разность энтальпий 1 *кг* воздуха при абсолютном давлении 1 *кгс/см²* и $T_1$ и 1 *кг* жидкого воздуха при том же давлении. Это то количество теплоты, которое нужно отнять от 1 *кг* воздуха, чтобы сжижить его при абсолютном давлении 1 *кгс/см²*. Холодопроизводительность процесса равна разности энтальпий воздуха при температуре $T_1$ и абсолютных давлениях $p_1$ и $p_2$. На диаграмме *S—T* эта холодопроизводительность определяется разностью энтальпий в точках *1* и *1'*, лежащих на линии $p_1=\text{const}$. Эту же величину можно определить по диаграмме *T—i* (см. рис. 2.10 и пример 2, разд. 2.3).

Количество получаемого жидкого воздуха ($x$) в цикле с дросселированием определяется из уравнения теплового баланса и зависит от холодопроизводительности цикла; оно равно

$$x=\frac{i_1-i_3}{i_1-i_0}\ \textit{ккал/кг}\ \text{воздуха} \qquad (2.14)$$



Пусть, например, установка перерабатывает 150 *кг/ч* воздуха при абсолютном давлении 200 *кгс/см²*. Начальная температура $t_1=t_3=27\,°C$, т. е. $T_1=T_3=300\,°K$. Процесс идеальный, без потерь холода. Абсолютное давление после дросселирования $p_2=1$ *кгс/см²*.

По диаграмме *S—T* (см. рис. 2.5 в Приложении) для этих условий имеем:

при $T_1=300\,°K$ и $p_1=1$ *кгс/см²* значение
$i=122{,}2$ *ккал/кг* (511,6 *кдж/кг*)
при $T_1=300\,°K$ и $p_2=200$ *кгс/см²* значение
$i_3=113{,}9$ *ккал/кг* (476,9 *кдж/кг*)

Холодопроизводительность $Q=150(122{,}2-113{,}9)=150\cdot 8{,}3=1245$ *ккал/ч* (5212,6 *кдж/ч*). При абсолютном давлении 1 *кгс/см²* энтальпия жидкого воздуха $i_1=22$ *ккал/кг* (92,1 *кдж/кг*). Таким образом, количество получаемого жидкого воздуха (в % от общего количества перерабатываемого воздуха) составит:

$$x=150\cdot\frac{122{,}2-113{,}9}{122{,}2-22}=150\cdot\frac{8{,}3}{100{,}2}=12{,}5\ \textit{кг/ч},$$

или

$$\frac{12{,}5}{150}\cdot 100=8{,}3\%$$

Из диаграммы *S—T* следует, что с повышением начального давления воздуха холодопроизводительность цикла с дросселированием возрастает, так как величина $i_3$, т. е. энтальпия поступающего в теплообменник сжатого воздуха, уменьшается; тем самым увеличивается количество сжиженного воздуха на 1 *кг* сжатого воздуха.

Для сжижения воздуха необходимо сжать его в компрессоре, на что затрачивается механическая работа, которая тем больше, чем выше конечное давление сжатия. Работу в *кгс·м*, затрачиваемую на изотермическое сжатие 1 *кг* воздуха, можно определить по формуле

$$L_{из}=2{,}303RT\lg\frac{p_2}{p_1} \qquad (2.15)$$

где $L_{из}$ — работа, затрачиваемая на изотермическое сжатие 1 *кг* воздуха с начального абсолютного давления $p_1$ до конечного $p_2$, *кгс·м*;
$R$ — характеристическая постоянная газа, подвергаемого сжатию; для воздуха $R=29{,}27$ *кгс·м/(кг·град)*, или 283,0 *дж/(кг·град)*;
$T$ — начальная и конечная температуры сжатия, °K;
$\lg\frac{p_2}{p_1}$ — десятичный логарифм отношения конечного давления сжатия $p_2$ к начальному давлению $p_1$;
2,303 — множитель перевода натуральных логарифмов в десятичные.

Если работу сжатия газа выразить в *квт·ч*, с учетом того, что 1 *кгс·м*=1/427 *ккал* и 1 *квт·ч*=860 *ккал*, то получим:

$$N_{из}=\frac{2{,}303}{427\cdot 860}RT\lg\frac{p_2}{p_1}\ \textit{квт·ч/кг} \qquad (2.16)$$

Так как 1 *квт·ч* = 3600 *кдж*, то в единицах СИ эта формула имеет следующий вид:

$$N_{из} = \frac{2{,}303 \cdot 3600}{427 \cdot 860} RT \lg \frac{p_2}{p_1} = 0{,}0226 RT \lg \frac{p_2}{p_1} \text{ кдж/кг} \qquad (2.17)$$

Действительная работа, измеренная на валу компрессора ($N_в$), больше изотермической на величину потерь энергии в компрессоре, которые оцениваются так называемым общим или полным изотермическим коэффициентом полезного действия компрессора — $\eta_{из.п}$. Величина $\eta_{из.п}$ может колебаться в широких пределах в зависимости от совершенства конструкции и качества изготовления компрессора. Для поршневых компрессоров, применяемых в воздухоразделительных установках, значения $\eta_{из.п}$ находятся в пределах 0,4—0,64, в среднем 0,55—0,6. Если принять $\eta_{из.п} = 0{,}59$, то формула расхода энергии на сжатие, измеренного на валу компрессора, примет вид:

$$N_в = \frac{2{,}303}{427 \cdot 860 \cdot 0{,}59} RT \lg \frac{p_2}{p_1} = 0{,}0000107 RT \lg \frac{p_2}{p_1} \text{ квт·ч/кг} \qquad (2.18)$$

В единицах СИ эта формула имеет вид:

$$N_в = 3600 \cdot 0{,}0000107 RT \lg \frac{p_2}{p_1} = 0{,}038 RT \lg \frac{p_2}{p_1} \text{ кдж/кг} \qquad (2.19)$$

**Пример.** Пусть сжимается 1 *кг* воздуха до абсолютного давления 200 *кгс/см²* при начальной температуре 30 °С ($T_1$ = 303 °К). Тогда

$$N_в = 0{,}0000107 \cdot 29{,}27 \cdot 303 \cdot 2{,}301 \approx 0{,}22 \text{ квт·ч/кг} =$$
$$= 0{,}22 \cdot 3600 = 792 \text{ кдж/кг воздуха}$$

Таким образом, при одной и той же начальной температуре затрачиваемая на сжатие воздуха работа пропорциональна значению $\lg \frac{p_2}{p_1}$, так как остальные входящие в формулу величины остаются постоянными.

Приводим значения $\lg \frac{p_2}{p_1}$ в зависимости от абсолютного давления сжатия при начальном абсолютном давлении $p_1 = 1$ *кгс/см²*:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Абсолютное давление $p_2$ сжатия, *кгс/см²* | 1 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 | 220 |
| $\lg \frac{p_2}{p_1}$ | 0 | 1,477 | 1,699 | 2,000 | 2,176 | 2,301 | 2,342 |

Из приведенных данных видно, что возрастание величины $\lg \frac{p_2}{p_1}$, а следовательно, увеличение работы сжатия 1 *кг* воздуха происходит не прямо пропорционально возрастанию конечного давления сжатия. Например, при конечном абсолютном давлении сжатии 50 *кгс/см²* работа сжатия

$$N_в = 0{,}0000107 \cdot 29{,}27 \cdot 303 \cdot 1{,}699 = 0{,}162 \text{ квт·ч/кг}$$



Сравнение этой величины с работой сжатия 1 *кг* воздуха до абсолютного давления 200 *кгс/см²* показывает, что возрастание конечного давления в 4 раза привело к увеличению работы сжатия всего в 0,22 : 0,162 = 1,36 раза. Чем больше конечное давление сжатия, тем медленнее возрастает работа на сжатие газа до этого давления.

Выше, при составлении теплового баланса цикла с дросселированием, было принято, что потери холода равны нулю. В действительности работа на сжижение сопровождается следующими потерями холода:

$q_и$ — потери через изоляцию;

$q_{пед}$ — потери от недорекуперации на теплом конце теплообменника.

Практически $q_и$ = 0,75—1,55 *ккал* на 1 *кг* перерабатываемого воздуха. Величина $q_и$ тем больше, чем больше поверхность кожуха, приходящаяся на 1 *кг* перерабатываемого воздуха, и чем хуже изоляция.

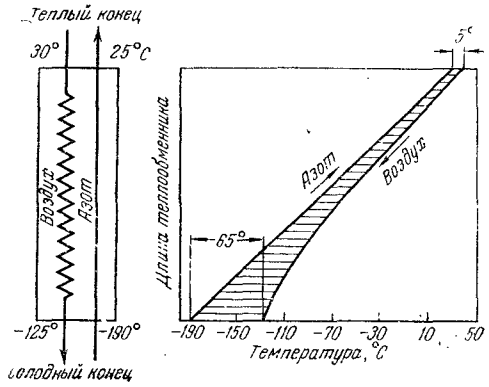



Рис. 2.15. Схема распределения температур по длине теплообменника.

Рассмотрим причину потерь холода от недорекуперации в теплообменниках. Через теплообменник проходят прямой и обратный потоки газов (рис. 2.15). Пусть сжатый воздух поступает в теплый конец теплообменника с температурой 30 °С, а удаляется через холодный его конец с температурой —125 °С.

Допустим, что охлаждение воздуха в теплообменнике осуществляется холодным азотом, поток которого направлен навстречу сжатому воздуху. Примем, что азот поступает в теплообменник с температурой —190 °С, нагревается за счет теплоты сжатого воздуха и с температурой 25 °С покидает теплообменник. Из графика изменения температуры воздуха и азота по длине теплообменника на рис. 2.15 видно, что по всей длине теплообменника сохраняется разность температур между воздухом и азотом (на графике отмечено штриховкой). Эта разность температур и обусловливает переход теплоты от воздуха к азоту. Чем меньше разность температур, тем меньше теплоты передается на данном участке и, следовательно, тем длиннее должен быть теплообменник для того, чтобы обеспечивалась необходимая поверхность теплопередачи. Однако применение очень длинных теплообменников практически нецелесообразно. Поэтому приходится считаться с тем, что на теплом конце теплообменника удаляемый азот будет иметь более низкую температуру, чем поступающий воздух.

Таким образом, практически невозможно всю теплоту сжатого воздуха передать азоту или, как принято говорить, рекуперировать* весь «холод» отходящего азота. Часть холода азот уносит из теплообменника, и это составляет потерю холода от недорекуперации в теплообменнике. Данную величину можно подсчитать, зная теплоемкость отходящего газа и разность температур на теплом конце теплообменника.

Из рис. 2.15 видно, что разность температур воздуха и азота, равная вначале 5 °С, увеличивается по мере удаления от теплого конца теплообменника и приближения к холодному концу, где она в рассматриваемом примере достигает 65 °С. Это объясняется тем, что по мере охлаждения сжатого воздуха в теплообменнике теплоемкость воздуха увеличивается, теплоемкость же обратного потока газа( в данном случае азота, идущего под небольшим давлением) остается почти постоянной. Поэтому ближе к холодному концу воздух охлаждается потоком холодного азота в меньшей степени, чем на участках теплообменника, расположенных ближе к теплому концу.

Возвратимся к рассмотрению цикла с дросселированием воздуха.

Потери холода от недорекуперации

$$q_{\text{нед}} = C_p \Delta t \ \textit{ккал/кг} \qquad (2.20)$$

где $\Delta t$ — недорекуперация на теплом конце теплообменника, °С;
$C_p$ — теплоемкость воздуха, *ккал/(кг·град)*.

Например, при $\Delta t = 5$ °С

$$q_{\text{нед}} = 0{,}241 \cdot 5 = 1{,}20 \ \textit{ккал/кг}$$

С учетом потерь действительное количество жидкого воздуха будет меньше. Оно определяется из следующего уравнения теплового баланса:

$$Q = i_1 - i_3 = x(i_1 - i_0) + q_{\text{и}} + q_{\text{нед}} \qquad (2.21)$$

откуда

$$x = \frac{i_1 - i_3 - q_{\text{и}} - q_{\text{нед}}}{i_1 - i_0} \ \textit{кг/кг} \text{ воздуха} \qquad (2.22)$$

Так, для приведенного примера, принимая $q_{\text{и}} = 1{,}0$ *ккал/кг* и $q_{\text{нед}} = 1{,}2$ *ккал/кг*, находим действительное количество получаемого жидкого воздуха:

$$x_{\text{д}} = 150 \cdot \frac{122{,}2 - 113{,}9 - 1{,}0 - 1{,}2}{122{,}2 - 22} = 150 \cdot \frac{6{,}1}{100{,}2} = 9{,}12 \ \textit{кг/ч}$$

или

$$x_{\text{д}} = \frac{9{,}12}{150} \cdot 100 = 6{,}08\% \text{ от массы перерабатываемого воздуха}$$

* Т. е. получить обратно, возвратить.



Для получения этого количества жидкого воздуха необходимо сжать его до абсолютного давления 200 *кгс/см²*. По приведенным выше данным (значения $\lg \frac{p_2}{p_1}$) подсчитываем расход энергии на сжатие 1 *кг* воздуха:

$$N_{\text{в}} = 0{,}0000107 RT \lg \frac{p_2}{p_1} = 0{,}0000107 \cdot 29{,}27 \cdot 303 \cdot 1{,}301 = 0{,}217 \ \textit{квт·ч/кг}$$

или

$$N_{\text{уд}} = \frac{150 \cdot 0{,}217}{9{,}12} = 3{,}56 \ \textit{квт·ч/кг}$$

или

$$3{,}56 \cdot 3600 = 12\,816 \ \textit{кдж/кг} \text{ полученного жидкого воздуха}$$

Этим же способом можно подсчитать затрату энергии и количество получаемого жидкого воздуха для других давлений сжатия в цикле с дросселированием.

Ниже приводятся данные, характеризующие затрату энергии на получение 1 *кг* жидкого воздуха и количество жидкого воздуха, получаемого в цикле с дросселированием при различном давлении сжатого воздуха:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Абсолютное давление сжатого воздуха, *кгс/см²* | 60 | 100 | 150 | 200 |
| Холодопроизводительность* | | | | |
| *ккал/кг* | 3,0 | 5,0 | 6,7 | 8,1 |
| *кдж/кг* | 12,6 | 20,9 | 28,1 | 33,9 |
| Количество жидкого воздуха*, получающегося из 1 *кг* сжатого воздуха, *кг* | 0,0025 | 0,0225 | 0,0395 | 0,0535 |
| Фактическая затрата энергии на 1 *кг* сжиженного воздуха* | | | | |
| *квт·ч* | 70,0 | 8,4 | 5,2 | 4,1 |
| *кдж* | $252 \cdot 10^3$ | $30{,}2 \cdot 10^3$ | $18{,}7 \cdot 10^3$ | $14{,}8 \cdot 10^3$ |

* Потери приняты: через изоляцию $q_{\text{н}} = 1{,}55$ *ккал/кг* (6,5 *кдж/кг*); от недорекуперации $q_{\text{нед}} = 1{,}2$ *ккал/кг* (5,0 *кдж/кг*). В случае других потерь холода данные о количестве получаемого жидкого воздуха и затрате энергии должны быть подсчитаны по приведенным выше формулам.

Приведенные данные подсчитаны для начальной температуры сжимаемого воздуха 30 °С и конечного абсолютного давления дросселирования 1 *кгс/см²*.

Из этих данных видно, что с ростом давления воздуха холодопроизводительность и количество получаемого жидкого воздуха на 1 *кг* перерабатываемого воздуха увеличиваются, а затрата энергии на 1 *кг* сжиженного воздуха уменьшается. Как уже указывалось, это объясняется тем, что холодопроизводительность процесса возрастает пропорционально разности давлений (при данной температуре), в то время как затрачиваемая работа растет пропорционально только логарифму отношения конечного и начального давлений. Однако даже при сжатии до абсолютного давления

200 *кгс/см*² и принятых величинах холодопотерь в цикле с дросселированием можно получить не более 0,0535 *кг* жидкого воздуха на 1 *кг* воздуха, т. е. в жидкость переходит не более 5,35% перерабатываемого воздуха. По сравнению с идеальным циклом для действительного процесса требуется примерно в 20 раз больше энергии.

С понижением давления холодопроизводительность уменьшается настолько, что влияние потерь холода становится очень заметным и количество жидкого воздуха, приходящегося на каждый килограмм сжатого воздуха, сильно уменьшается. Ввиду того что потери холода всегда имеются, покрыть эти потери сжижением воздуха при абсолютных давлениях сжатия ниже 60 *кгс/см*² в этом цикле практически нельзя. Тем не менее цикл с дросселированием ввиду его крайней простоты весьма широко применяется в холодильных процессах кислородных и азотных установок.

Недостатком цикла с дросселированием является относительно высокий удельный расход энергии, а также необходимость применения воздуха высокого давления. По данному циклу (в его простейшем виде) обычно работают установки малой и средней производительности для получения газообразного кислорода. В этих установках холодильный цикл с дросселированием служит для покрытия потерь холода в кислородном аппарате.

### 2.4.3. Холодильный цикл с дросселированием и предварительным охлаждением воздуха

Предварительное охлаждение воздуха перед теплообменником улучшает показатели холодильного цикла с дросселированием примерно в 2—3 раза. Рассмотрим этот цикл.

Из диаграммы *S—T* (см. рис. 2.5 в Приложении) видно, что с понижением температуры воздуха на входе в теплообменник разность энтальпий воздуха при $p_а$=200 *кгс/см*² и 1 *кгс/см*² возрастает. Например, при 0 °С эта разность равна 115,8—105=10,8 *ккал/кг*, а при —40 °С увеличивается до 106—90=16 *ккал/кг*.

Следовательно, чем ниже температура сжатого воздуха на теплом конце теплообменника, тем выше холодопроизводительность цикла при дросселировании и тем больше получается жидкого воздуха при той же затрате работы.

Количество жидкого воздуха увеличивается в данном случае еще и потому, что необходимое для сжижения количество холода снижается вследствие уменьшения энтальпии воздуха после предварительного охлаждения. Действительно, из диаграммы *S—T* следует, что для сжижения предварительно охлажденного до —40 °С воздуха необходимо отнять 106—22,5=83,5 *ккал/кг* вместо 100,5 *ккал/кг* при сжижении воздуха с начальной температурой 30 °С.

Поэтому разработан цикл с предварительным охлаждением воздуха перед теплообменником с помощью аммиачной холодильной установки до температуры (—40)—(—45) °С. Затрата энергии в аммиачном холодильном цикле невелика, и получаемый при этом холод обходится относительно недорого.



В цикле с предварительным аммиачным охлаждением (рис. 2.16) воздух сжимается компрессором *1*, охлаждается водой в холодильниках и по трубе *2* поступает в предварительный теплообменник *3*,

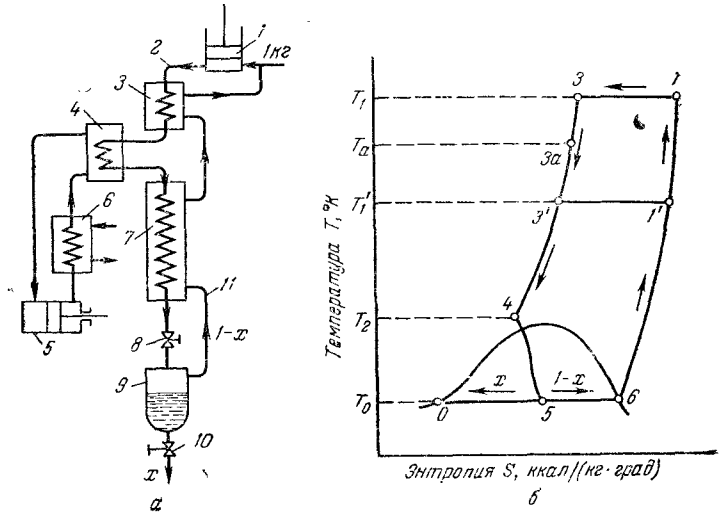



Рис. 2.16. Цикл с дросселированием и предварительным аммиачным охлаждением воздуха:

*а* — схема цикла: *б* — цикл на диаграмме *S — T*; *1* — компрессор; *2* — труба высокого давления; *3* — предварительный теплообменник; *4* — аммиачный теплообменник; *5* — аммиачный компрессор; *6* — конденсатор аммиака; *7* — основной теплообменник; *8* — дроссельный вентиль; *9* — резервуар жидкого воздуха; *10* — сливной кран; *11* — труба для газообразного воздуха.

где охлаждается дросселированным воздухом. Затем воздух направляется в аммиачный теплообменник *4* для охлаждения аммиаком, поступающим из аммиачного компрессора *5* через конденсатор *6*. Охлажденный в аммиачном теплообменнике воздух направляется в основной противоточный теплообменник *7*, охлаждается дросселированным воздухом и, пройдя дроссельный вентиль *8*, частично сжижается и накапливается в резервуаре *9*; отсюда жидкий воздух сливается через кран *10*.

Оставшаяся несжиженной после дроссельного вентиля *8* часть воздуха отводится из резервуара *9* по трубе *11* противотоком сжатому воздуху в основной *7* и затем в предварительный *3* теплообменники для охлаждения сжатого воздуха, поступающего на дросселирование. Аммиачный теплообменник размещается между предварительным и основным теплообменниками для того, чтобы полнее использовать холод дросселированного воздуха. Если исключить предварительный теплообменник, дросселированный воздух будет

нагреваться только до температуры сжатого воздуха, при которой он отводится из аммиачного теплообменника, т. е. до —40 °С, и значительная часть холода дросселированного воздуха останется неиспользованной.

Небольшая дополнительная затрата энергии в аммиачной холодильной машине с избытком покрывается увеличением холодопроизводительности, и экономичность цикла возрастает.

На диаграмме $S—T$ для этого цикла (рис. 2.16, *б*) показаны состояния: воздуха перед компрессором — точка *1*; воздуха после компрессора — точка *3*, воздуха при входе в аммиачный теплообменник, т. е. после предварительного теплообменника — точка *3а*; воздуха после аммиачного теплообменника — точка *3'*; воздуха перед дросселем — точка *4*; воздуха после дросселя — точка *5*; жидкого воздуха в сборнике — точка 0; паров холодного дросселированного воздуха (обратный поток) перед основным теплообменником — точка *6*; обратного потока воздуха после основного и перед предварительным теплообменниками — точка *1'*.

Составим тепловой баланс цикла с дросселированием и предварительным охлаждением воздуха. В предварительном теплообменнике обратный поток $(1-x)$ — часть, приходящаяся на 1 *кг* воздуха, отдает поступающему воздуху количество холода, равное $(1-x)\ (i_1-i'_1)$ *ккал/кг*. При этом сжатый воздух охлаждается с $T_1$ до $T_3$, отдавая обратному потоку $i_3-i$ количество теплоты. Следовательно, тепловой баланс предварительного теплообменника выразится равенством

$$i_3 - i_3^{а} = (1-x)\left(i_1 - i'_1\right)$$

или

$$i_3^{а} = i_3 - (1-x)\left(i_1 - i'_1\right) = i'_1 - (i_1 - i_3) + x\left(i_1 - i'_1\right) \qquad (2.23)$$

Количество холода, вносимое аммиачной установкой

$$Q_а = i_3^{а} - i'_3 \ \textit{ккал/кг}$$

Подставив значение $i_3^{а}$, получим:

$$Q_а = (i'_1 - i'_3) - (i_1 - i_3) + x\,(i_1 - i'_1) \ \textit{ккал/кг} \qquad (2.24)$$

Обозначим: $Q'_2 = i'_1 - i'_3$ — холодопроизводительность цикла с дросселированием и предварительным охлаждением, *ккал/кг*;

$Q_2 = i_1 - i_3$ — холодопроизводительность цикла с дросселированием без предварительного охлаждения, *ккал/кг*;

$x(i_1 - i'_1)$ — расход холода на охлаждение сжижаемой части воздуха от начальной температуры до температуры предварительного охлаждения, *ккал/кг*.



Таким образом, вносимый аммиачной установкой холод равен увеличению холодопроизводительности цикла плюс количество холода, расходуемое на дополнительное охлаждение сжижаемой части воздуха от начальной температуры до температуры входа в основной теплообменник.

**Пример.** Рассчитать баланс цикла с предварительным охлаждением воздуха. Начальное абсолютное давление воздуха 1 *кгс/см²*; температура 303 °К (30 °С). Абсолютное давление сжатия 200 *кгс/см²*. Предварительное охлаждение аммиаком производится до температуры —40 °С. Потери холода: $q_и = 1{,}55$ *ккал/кг* и $q_{нед} = 1{,}2$ *ккал/кг*.

По диаграмме $S - T$ определяем холодопроизводительность:

$$T_1 = 273 - 40 = 233\ °К; \quad p_1 = 1\ \textit{кгс/см}^2; \quad i'_1 = 106\ \textit{ккал/кг}$$

При той же температуре, но при давлении $p_2 = 200$ *кгс/см²* $i'_3 = 90$ *ккал/кг*. Холодопроизводительность цикла равна:

$$Q'_2 = i'_1 - i'_3 = 106 - 90 = 16\ \textit{ккал/кг}$$

Количество получаемого жидкого воздуха:

$$x = \frac{i'_1 - i'_3 - q_и - q_{нед}}{i'_1 - i_0} = \frac{106 - 90 - 1{,}55 - 1{,}2}{106 - 22{,}5} = 0{,}16\ \textit{кг/кг}\ \text{воздуха}$$

Согласно формуле (2.24), от аммиака будет передано холода:

$$Q_а = (106 - 90) - (122{,}9 - 114{,}8) + 0{,}16\,(122{,}9 - 106) =$$
$$= 16 - 8{,}1 + 0{,}16 \cdot 16{,}9 = 10{,}6\ \textit{ккал/кг}$$

Затрата энергии слагается из двух частей:

а) на сжатие воздуха с 1 до 200 *кгс/см²* [см. уравнение (2.18)]:

$$N_1 = 0{,}0000107 \cdot 29{,}27 \cdot 303 \cdot 2{,}301 = 0{,}217\ \textit{квт·ч/кг}$$

б) на работу аммиачной машины, потребляющей 0,865 *квт·ч* на 1000 *ккал*:

$$N_а = 0{,}865 \cdot \frac{Q_а}{1000} = 0{,}865 \cdot 10{,}6 \cdot 0{,}001 = 0{,}0092\ \textit{квт·ч/кг}$$

Общий расход энергии составит:

$$N_в = N_1 + N_а = 0{,}217 + 0{,}0092 \approx 0{,}23\ \textit{квт·ч/кг}\ (828\ \textit{кдж/кг})$$

или на 1 *кг* жидкого воздуха:

$$N_{уд} = \frac{0{,}23}{0{,}16} = 1{,}44\ \textit{квт·ч/кг}\ (5184\ \textit{кдж/кг})$$

**К.п.д.** по сравнению с идеальным циклом составляет:

$$\frac{0{,}2}{1{,}44} \cdot 100 = 13{,}8\%$$

Сравнивая полученные результаты с данными, характеризующими простой цикл с дросселированием (см. разд. 2.4.2) для давления 200 *кгс/см²*, видим, что предварительное охлаждение почти в три раза улучшает показатели цикла.

Дальнейшее повышение экономичности циклов с дросселированием достигается применением воздуха двух давлений: низкого $p_а = 6$ *кгс/см²* и высокого $p_а = 200$ *кгс/см²*, как с применением предварительного аммиачного охлаждения обоих потоков воздуха, так и без такового. В цикле с дросселированием, с двумя давлениями и с аммиачным охлаждением холодопроизводительность составляет около 200 *ккал* на *1 квт·ч* (0,22 *кдж* на 1 *кдж*) затраченной энергии вместо максимальной холодопроизводительности 40 *ккал* на 1 *квт·ч* (0,045 *кдж/кдж*) в простом цикле с дросселированием, т. е. эффективность цикла в этом случае увеличивается в 5 раз. Однако циклы с несколькими давлениями и применением аммиачного охлаждения сложнее и поэтому используются только в более крупных установках, например производительностью 1000—3500 *м³/ч* газообразного кислорода.

### 2.4.4. Холодильные циклы с расширением воздуха в детандере и отдачей внешней работы

**Цикл среднего давления с расширением воздуха в поршневом детандере.** Схема цикла среднего давления с поршневым детандером изображена на рис. 2,17, *а*. Воздух сжимается в компрессоре *1* до абсолютного давления 20—40 *кгс/см²* и, пройдя через змеевик водяного холодильника *2*, поступает в теплообменники *3* и *4*. После теплообменника *3* часть воздуха (примерно 70—80%) отводится в цилиндр поршневого детандера *6*. Сжатый и охлажденный в предварительном теплообменнике *3* воздух, расширяясь до абсолютного давления 1 *кгс/см²*, толкает поршень детандера и, производя при этом внешнюю работу, сильно охлаждается.

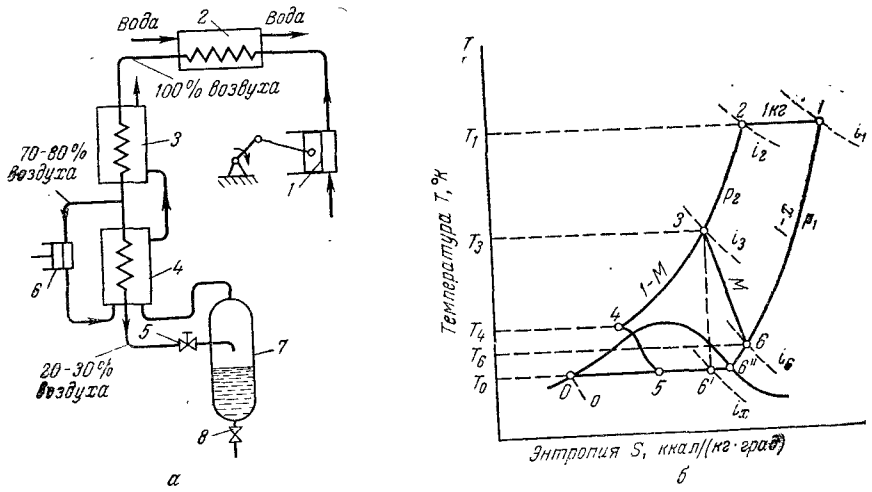



Рис. 2.17. Цикл среднего давления с поршневым детандером:
*а* — схема цикла; *б* — цикл на диаграмме $S - T$; *1* — компрессор; *2* — холодильник; *3*, *4* — теплообменники; *5* — дроссельный вентиль; *6* — поршневой детандер; *7* — сборник; *8* — вентиль слива жидкого воздуха.

После расширения и охлаждения в детандере воздух выводится наружу через теплообменники *4* и *3*, охлаждая поступающий сжатый воздух. Часть сжатого воздуха, не прошедшая через детандер (примерно 20—30%), поступает к дроссельному вентилю *5* и, сжижаясь после дросселирования, накапливается в сборнике *7*, откуда сливается через вентиль *8*. Несжижившаяся часть воздуха из сосуда *7* направляется в теплообменники *4* и *3*.

Количество холода, получаемое в цикле с детандером, зависит от давления сжатия, температуры и количества воздуха, направляемого в детандер. Чем меньше давления сжатия, тем более низкую температуру должен иметь воздух перед детандером и тем большее количество воздуха должно направляться в детандер.

Диаграмма $S—T$ для цикла среднего давления с детандером показана на рис. 2.17, *б*. Воздух, сжатый изотермически при $T_1$ по линии *1—2*, охлаждается под давлением $p_2$ в теплообменнике *3* до температуры $T_3$. В точке *3* часть воздуха (количество *M*) идет в детандер, где расширяется по линии *3—6* до давления $p_1$, охлаждаясь при этом до $T_6$. По линии *6—1* в теплообменниках, основном *4* и предварительном *3*, происходит передача холода потоку сжатого воздуха от воздуха после детандера. Остальная часть воздуха высокого давления по линии *3—4* охлаждается в основном теплообменнике и в точке *4* по линии *4—5* ($i = \text{const}$) дросселируется и сжижается (количество *x*), а затем выводится из ожижителя. Несжижившаяся часть воздуха (количество $1—M—x$) отводится через теплообменники *4* и *3*, где смешивается с воздухом из детандера, охлаждая сжатый воздух по линии *6—1*.

Обозначив количество воздуха, поступающего в детандер, через *M кг/кг*, получим холодопроизводительность цикла

$$Q = (i_1 - i_2) + M(i_3 - i_6) \text{ ккал/кг} \qquad (2.25)$$

При сжижении *x кг* воздуха и потерях холода $q_и + q_{нед}$ тепловой баланс имеет следующий вид:

$$x(i_1 - i_6) + (q_и + q_{нед}) = (i_1 - i_2) + M(i_3 - i_6) \qquad (2.26)$$

откуда

$$x = \frac{(i_1 - i_2) + M(i_3 - i_6)(q_и + q_{нед})}{i_1 - i_0} \text{ кг/кг сжатого воздуха} \qquad (2.27)$$

**Пример.** Абсолютное давление воздуха $p_1 = 1$ *кгс/см²*; $T_1 = 303$ °K; $p_2 = 40$ *кгс/см²*; к.п.д. детандера 0,6; $M = 0,7$; потери холода $q_и + q_{нед} = 3$ *ккал/кг*.

По диаграмме $S — T$ находим эффект дросселирования $i_1 - i_2 = 122,9 - 121 = 1,9$ *ккал/кг*; теплоперепад в детандере $i_3 - i_6$, следовательно $\frac{i_3 - i_6}{i_3 - i_x} = 0,6$, где $i_x$ — энтальпия воздуха в конце адиабатического расширения от точки *3* на изобаре $p_2$ (рис. 2.17, *б*).

Примем $T_3 = 190$ °K. Тогда по диаграмме $S — T$ находим $i_3 = 90$ *ккал/кг*. Опустив вертикаль из точки *3* на изобару $p_1 = 1$ *кгс/см²*, найдем точку их пере

сечения 6′, через которую проходит линия энтальпии для $i_x$, соответствующая значению $i_x = 64$ *ккал/кг*. Следовательно

$$i_6 = i_3 - 0,6\,(i_3 - i_x) = 90 - 0,6\,(90 - 64) = 74,4 \text{ ккал/кг } (311 \text{ кдж/кг})$$

При абсолютном давлении $p_1 = 1$ *кгс/см²* этому соответствует температура $T_6 = 103$ °К. Тогда действительный теплоперепад в детандере равен:

$$i_3 - i_6 = 90 - 74,4 = 15,6 \text{ ккал/кг } (65 \text{ кдж/кг})$$

Подставив в уравнение (2.27) принятые и найденные величины, получим:

$$x = \frac{1,9 + 0,7 \cdot 15,6 - 3}{122,9 - 22,5} = \frac{9,8}{100,4} \approx 0,098 \text{ кг/кг, или } 9,8\%$$

Как видно из рис. 17, *б*, с повышением температуры перед детандером ($T_3$) количество холода, получаемого в детандере, увеличивается. Однако это вызывает повышение температуры ($T_6$) после детандера; но чем выше температура $T_6$, тем, очевидно, будет выше и температура $T_4$ сжатого воздуха перед дросселированием, что уменьшает количество воздуха, сжижаемого при дросселировании, как это видно на диаграмме $S$—$T$.

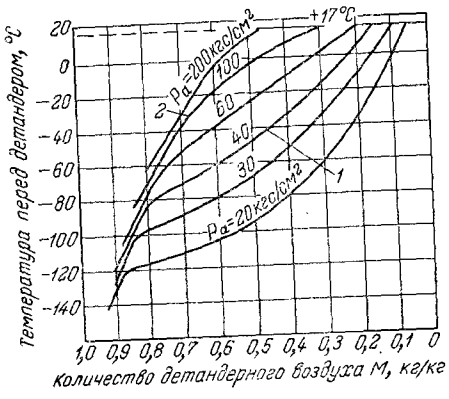



Рис. 2.18. Взаимосвязь между оптимальной температурой воздуха перед детандером и количеством детандерного воздуха (по Гаузену): *1* — цикл среднего давления; *2* — цикл высокого давления.

Действительно, с повышением температуры $T_4$ линия дросселирования *4—5* располагается правее и длина отрезка *5—6″*, пропорциональная количеству сжижаемого воздуха, уменьшается. Поэтому в циклах с детандером каждому давлению $p_2$ и количеству детандерного воздуха $M$ соответствует наивыгоднейшая (оптимальная) температура воздуха $T_3$ перед детандером.

Взаимосвязь между температурой воздуха перед детандером и количеством воздуха, поступающего в детандер, изображена графически на рис. 2.18. Точки резкого перегиба кривых показывают оптимальные значения температуры перед детандером; при этих температурах и соответствующих им количествах детандерного воздуха выход жидкого воздуха будет наибольшим при наименьшем удельном расходе энергии.

Наивыгоднейшие условия цикла с детандером можно определить, составив тепловой баланс теплообменников и проверив осуществимость в них теплообмена между сжатым воздухом и расширенным детандерным и дросселированным воздухом. Этот теплообмен возможен, если обеспечено достаточное количество детандерного воздуха в теплообменнике.



Теплоемкость сжатого воздуха по мере его охлаждения сильно возрастает (см. рис. 2.3), особенно вблизи холодного конца теплообменника при давлениях порядка 50—70 *кгс/см²* и температурах от —90 до —140 °С. В этой части теплообменника воздух поглощает больше холода. При недостаточном количестве обратного потока детандерного воздуха возникающая здесь разность температур (температурный напор) между прямым и обратным потоками может оказаться незначительной и даже стать отрицательной; тогда сжатый воздух вместо отдачи теплоты детандерному воздуху, будучи более холодным, начнет, наоборот, отнимать теплоту от детандерного воздуха и нагреваться. Для предупреждения этого явления приходится заведомо увеличивать температурный напор в теплообменнике, пропуская через него большее количество детандерного воздуха, но при этом увеличиваются потери от недорекуперации, так как обратный поток уже не может достаточно нагреваться. Уменьшение потерь путем развития поверхности теплообменника невыгодно и, кроме того, вызывает увеличение гидравлического сопротивления, что снижает холодопроизводительность детандера, так как требует повышения давления в конце расширения воздуха в детандере.

Все эти условия необходимо учитывать при проектировании и регулировании установок с детандером. Следует выбирать наивыгоднейшие соотношения параметров процесса, при которых обеспечивается наибольшее количество холода на 1 *кг* перерабатываемого воздуха или получаемого продукта разделения.

Определим удельный расход энергии на 1 *кг* жидкого воздуха в цикле среднего давления с детандером. Расход энергии на сжатие воздуха в компрессоре до абсолютного давления $p_2 = 40$ *кгс/см²* согласно уравнению (2.18) равен:

$$N_1 = 0,0000107 RT \lg \frac{p_2}{p_1} = 0,0000107 \cdot 29,27 \cdot 303 \cdot 1,60 =$$

$$= 0,152 \text{ квт·ч/кг } (547,2 \text{ кдж/кг})$$

Количество энергии, возвращаемой детандером при механическом к. п. д. детандера $\eta_м = 0,8$:

$$N_3 = \frac{M\,(i_3 - i_6)\,0,8}{860} = \frac{0,70\,(90 - 74,1)\,0,8}{860} = 0,01 \text{ квт·ч/кг } (36 \text{ кдж/кг})$$

Удельный расход энергии на 1 *кг* жидкого воздуха

$$N_{уд} = \frac{N_1 - N_2}{x} = \frac{0,152 - 0,01}{0,098} = 1,45 \text{ квт·ч/кг} = 5220 \text{ кдж/кг}$$

Ниже приведены данные о расходе энергии на получение 1 *кг* жидкого воздуха и количестве жидкого воздуха при разных дав-

лениях сжатия в цикле с детандером для наивыгоднейших условий работы (при абсолютном давлении $p_1 = 1$ *кгс/см*$^2$), с учетом потерь холода.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Абсолютное давление сжатия в компрессоре $p_2$, *кгс/см*$^2$ | 20 | 40 | 200 |
| Количество жидкого воздуха, получаемого на 1 *кг* сжатого воздуха, *кг* | 0,0247 | 0,098 | 0,194 |
| Расход энергии с учетом возврата ее детандером | | | |
| *квт·ч/кг* жидкого воздуха | 4,58 | 1,45 | 1,04 |
| *кдж/кг* жидкого воздуха | 16488 | 5220 | 3744 |

Несмотря на то, что в цикле с детандером допустимы более низкие давления сжатия, чем в цикле с дросселированием, и, казалось бы, возможно получение жидкого воздуха весьма экономичным способом, тем не менее расход энергии на 1 *кг* перерабатываемого воздуха незначительно отличается от расхода в цикле с дросселированием и аммиачным охлаждением. Это объясняется тем, что в цикле с детандером возникают дополнительные потери холода в поршневом детандере и потери в результате неполного использования работы расширяющегося в нем воздуха. Практически удельный расход энергии в цикле с детандером равен расходу энергии в цикле двух давлений с дросселированием и предварительным аммиачным охлаждением.

Разработан также цикл с последовательным расширением воздуха в двухступенчатом детандере. Такие циклы со ступенчатым расширением воздуха и использованием одного или нескольких детандеров иногда применяются в крупных установках для получения жидкого кислорода, а также в установках для сжижения гелия.

**Цикл высокого давления с расширением воздуха в поршневом детандере.** Холодильный цикл высокого давления с поршневым детандером является видоизменением цикла среднего давления с детандером. Отличие заключается в том, что в цикле высокого давления не требуется предварительное охлаждение воздуха перед детандером до низких температур. Это является определенным преимуществом, если учесть трудности смазки цилиндра детандера при низкой температуре поступающего в него воздуха.

Схема цикла высокого давления с детандером и диаграмма $S—T$ для него представлены на рис. 2.19. Воздух сжимается до абсолютного давления 180—200 *кгс/см*$^2$ в компрессоре *1* и, пройдя через водяной холодильник *2*, распределяется на две примерно равные части (см. рис. 2.19, *а*). Одна часть ($M$) направляется в детандер *3*, расширяется в нем до абсолютного давления 1 *кгс/см*$^2$ и, охладившись, направляется в основной теплообменник *4*, по которому проходит обратным потоком, охлаждая вторую часть сжатого воздуха ($1—M$), поступающего из компрессора. Эта часть воздуха после теплообменника *4* поступает в дополнительный теплообменник *5*, где охлаждается дросселированным воздухом,



и подводится к дроссельному вентилю *6*, пройдя который, частично сжижается и собирается в сосуде *7*. Из сосуда *7* жидкий воздух в количестве *x кг* выводится через вентиль *8*. Несжижившийся воздух в количестве $1—M—x$ *кг* направляется обратно в теплообменники *5* и *4*, где охлаждает поступающий через них сжатый воздух. Через теплообменник *5* обратным потоком проходит воздух в количестве $(1—M—x+M) = (1—x)$ *кг*.

В рассматриваемом цикле также существует наивыгоднейшее соотношение между количеством воздуха, идущего в детандер,

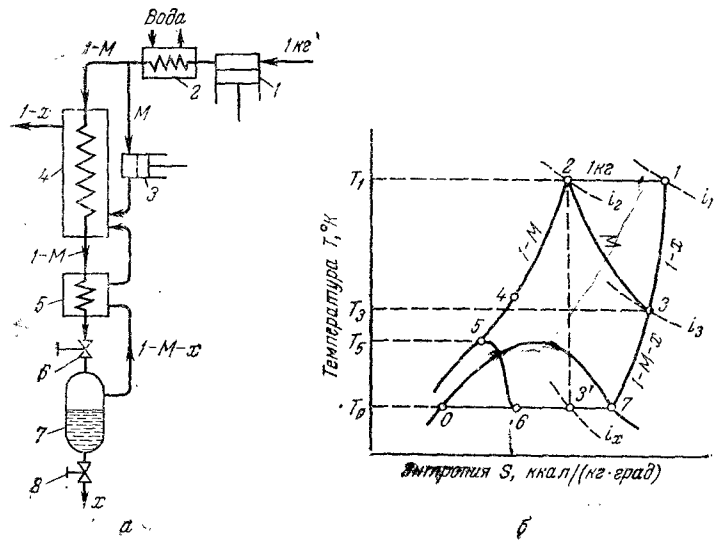



Рис. 2.19. Цикл высокого давления с расширением воздуха в детандере:
*а* — схема цикла; *б* — цикл на диаграмме $S—T$: *1* — компрессор; *2* — водяной холодильник; *3* — поршневой детандер; *4* — основной теплообменник; *5* — дополнительный теплообменник; *6* — дроссельный вентиль; *7* — сосуд для жидкого воздуха; *8* — сливной вентиль.

и давлением сжатия. При абсолютном давлении 200 *кгс/см*$^2$ наименьший расход энергии на 1 *кг* жидкого воздуха получается примерно при $M = 0{,}5$, т. е. когда в детандер поступает 50% подаваемого компрессором воздуха, а другая половина расширяется в дроссельном вентиле.

Подсчитаем теоретическое количество жидкого воздуха и удельный расход энергии для этого цикла при указанном соотношении.

Принимаем: абсолютные давления $p_1 = 1$ *кгс/см*$^2$; $p_2 = 200$ *кгс/см*$^2$; $T_1 = T_2 = 303$ °K; $M = 0{,}5$; адиабатический к.п.д. детандера 0,65; потери холода $q_{\text{н}} + q_{\text{нед}} = 3{,}5$ *ккал/кг*.

Холодопроизводительность цикла при этих условиях:

$$Q = i_1 - i_2 + M(i_2 - i_3) \qquad (2.28)$$

Величину $i_3$ находим по диаграмме $S$ — $T$ из соотношения

$$\frac{i_2 - i_3}{i_2 - i_x} = 0{,}65$$

откуда

$$i_3 = i_2 - 0{,}65\,(i_2 - i_x) = 114{,}8 - 0{,}65\,(114{,}8 - 64) = 81{,}8 \text{ ккал/кг } (342 \text{ кдж/кг})$$

Этому соответствует температура $T_3 = 133$ °К. Тогда

$$Q = 122{,}9 - 114{,}8 + 0{,}5\,(114{,}8 - 81{,}8) = 24{,}6 \text{ ккал/кг } (103 \text{ кдж/кг})$$

Жидкого воздуха получится:

$$x = \frac{Q - (q_и + q_{пед})}{i_1 - i_0} = \frac{24{,}6 - 3{,}5}{122{,}9 - 22} = 0{,}194 \text{ кг на 1 кг сжатого воздуха}$$

Расход энергии на сжатие воздуха в компрессоре от абсолютного давления $p = 1$ *кгс/см²* до $p_2 = 200$ *кгс/см²* по предыдущим примерам равен:

$$N_1 = 0{,}217 \text{ квт·ч/кг } (774 \text{ кдж/кг})$$

Энергия, отдаваемая детандером с механическим к.п.д. 0,8:

$$N_2 = \frac{M\,(i_2 - i_3)\,0{,}8}{860} = \frac{16{,}5 \cdot 0{,}8}{860} = 0{,}015 \text{ квт·ч/кг } (52 \text{ кдж/кг})$$

Удельный расход энергии на 1 *кг* жидкого воздуха:

$$N_{уд} = \frac{N_1 - N_2}{x} = \frac{0{,}217 - 0{,}015}{0{,}194} = 1{,}04 \text{ квт·ч } (3744 \text{ кдж/кг})$$

Из приведенного примера видно, что работа детандера составляет $\frac{0{,}015}{0{,}217} \cdot 100 = 6{,}9\%$ работы, затрачиваемой на сжатие воздуха в компрессоре.

Удельный расход энергии и количество получаемого жидкого воздуха в цикле высокого давления ($p_а = 200$ *кгс/см²*) с детандером, с учетом холодопотерь, приведены выше.

С повышением рабочего давления увеличивается количество получаемого жидкого воздуха и при $p_а = 200$ *кгс/см²* оно теоретически достигает 19,4% количества воздуха, перерабатываемого в установке. При получении жидкого кислорода теоретический расход энергии в рассматриваемом цикле будет больше, так как по условиям работы ректификационных аппаратов и вследствие невозможности полного расширения воздуха в цилиндре детандера, имеющем ограниченную длину, расширение ведут не до $p_а = 1$ *кгс/см²* а до $p_а = 6$—$7$ *кгс/см²*, что уменьшает теплоперепад в детандере. В этом случае, приняв абсолютное давление $p_1' = 8$ *кгс/см²*, получим $x = 0{,}16$ *кг/кг* и $N_{уд} = 1{,}29$ *квт·ч/кг* $= 4644$ *кдж/кг*.

Цикл высокого давления с детандером является наиболее экономичным из всех циклов получения жидкого воздуха и характеризуется наименьшей затратой энергии на получение 1 *кг* жидкого воздуха; в то же время обеспечивается наибольший выход жидкого



воздуха по отношению к количеству перерабатываемого воздуха.

В установках для получения жидкого кислорода применяют также цикл высокого давления с детандером и предварительным охлаждением воздуха перед детандером до минус 35—40 °С. При этом для предупреждения возможной конденсации воздуха в детандере в конце процесса расширения абсолютное рабочее давление должно быть снижено до 160—170 *кгс/см²*. Охлаждение сжатого воздуха перед детандером производится воздухом, расширившимся в детандере, аналогично тому, как это принято в цикле среднего давления с детандером. В этих условиях возможна осушка воздуха вымораживанием влаги в теплообменниках.

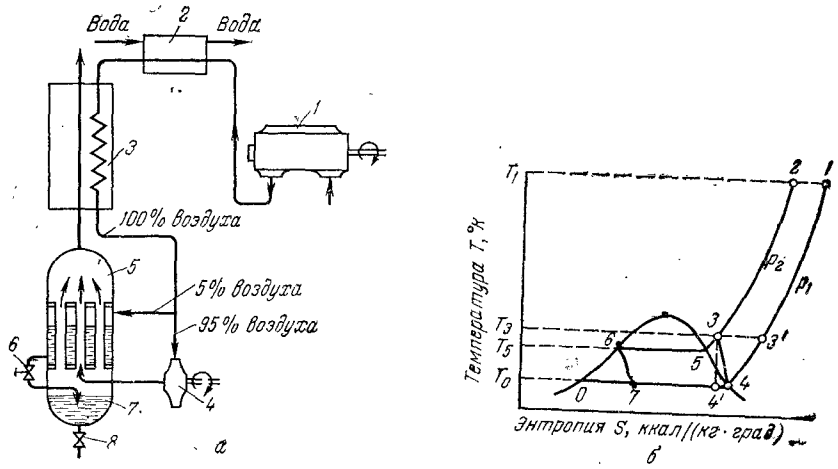



Рис. 2.20. Цикл низкого давления с расширением воздуха в турбодетандере (цикл Капицы):

*а* — схема цикла; *б* — цикл на диаграмме $S$ — $T$; *1* — турбокомпрессор; *2* — холодильник; *3* — регенераторы; *4* — турбодетандер; *5* — конденсатор; *6* — дроссельный вентиль; *7* — сборник жидкого воздуха; *8* — вентиль слива жидкого воздуха.

По расходу энергии на 1 *кг* жидкого продукта оба процесса равноценны.

**Цикл низкого давления с расширением воздуха в турбодетандере (цикл Капицы).** Холодильный цикл, разработанный акад. П. Л. Капицей в 1939 г., основан на применении воздуха низкого давления и получении необходимого холода только за счет расширения этого воздуха в воздушной турбине (так называемом турбодетандере) с производством внешней работы. Схема холодильного цикла Капицы и диаграмма $S$—$T$ цикла даны на рис. 2.20. Воздух (см. рис. 2.20, *а*) сжимается до абсолютного давления $p_2 = 6$—$7$ *кгс/см²* ($5{,}9$—$6{,}9 \cdot 10^5$ *н/м²*) в турбокомпрессоре *1*, охлаждается водой в холодильнике *2* и поступает в регенераторы (тепло-

обменники)* *3*, где охлаждается обратным потоком холодного воздуха. Основная часть воздуха (около 95%) после регенераторов направляется в турбодетандер *4*, расширяется в нем до начального абсолютного давления $p_1 = 1$ *кгс/см²* с производством внешней работы и при этом охлаждается почти до начала конденсации. Расширившийся в турбодетандере воздух подается в трубное пространство конденсатора *5* и конденсирует остальную часть сжатого воздуха (5%), поступающую в межтрубное пространство. Из конденсатора *5* основной поток воздуха направляется противотоком в регенераторы и охлаждает их насадку, которая после переключения потоков охлаждает поступающий сжатый воздух. Жидкий воздух из конденсатора через дроссельный вентиль *6* перепускается в сборник жидкого воздуха *7*, откуда сливается через вентиль *8*.

На диаграмме *S—T* этого цикла (см. рис. 2.20, *б*) изотермическое сжатие воздуха до абсолютного давления $p_2 = 6—7$ *кгс/см²* изображается горизонтальной линией *1—2*, а охлаждение в регенераторах до состояния *3* — изобарой *2—3*, соответствующей давлению $p_2$. По линии *3—4* происходит расширение воздуха в турбодетандере до абсолютного давления $p_1 = 1$ *кгс/см²*, причем линия *3—4'* соответствует адиабатическому процессу расширения, а линия *3—4* — действительному. Конденсация оставшейся части воздуха, не проходившей через турбодетандер, протекает по линии *3—5—6*. Линия постоянной энтальпии *6—7* соответствует процессу дросселирования воздуха, сжиженного в конденсаторе. Образующиеся при дросселировании пары жидкого воздуха смешиваются с потоком воздуха из турбодетандера и через трубки конденсатора поступают в регенератор, охлаждая его насадку; при этом они сами нагреваются до первоначальной температуры $T_1$ по линии *7—4—1* постоянного давления $p_1$.

Определим выход жидкого воздуха и расход энергии в этом цикле при оптимальных условиях. Для расчета примем следующие данные: абсолютные давления $p_1 = 1$ *кгс/см²* и $p_2 = 6$ *кгс/см²*; $T_1 = 293$ °К; адиабатический к.п.д. турбодетандера $\eta_{ад} = 0{,}8$. Потери через изоляцию $q_и = 1{,}5$ *ккал/кг*. Потери от недорекуперации при разности температур прямого и обратного потока воздуха на теплом конце регенератора 3 *град* и при количестве обратного потока газа, равном примерно 95% от количества поступающего воздуха, составят $q_{нед} = 0{,}95 \cdot 0{,}24 \cdot 3 \approx 0{,}7$ *ккал/кг*.

Суммарные холодопотери $q_и + q_{нед} = 1{,}5 + 0{,}7 = 2{,}2$ *ккал/кг*.

Принимаем температуру перед турбодетандером $T_3 = 113$ °К. Если обозначить через $x$ количество воздуха, сжижающегося при абсолютном давлении $p_2 = 6$ *кгс/см²*, то в детандер из точки *3* будет поступать количество воздуха $(1 - x)$. Тогда при составлении уравнения теплового баланса для 1 *кг* воздуха можно написать следующие выражения:

холодопроизводительность цикла

$$Q = (i_1 - i_2) + (1 - x)\,\eta_{ад}\,(i_3 - i_4') \text{ ккал/кг} \qquad (2.29)$$

затрата холода

$$Q_1 = x\,(i_1 - i_6) + q_и + q_{нед} \qquad (2.30)$$

* На схеме условно показан один регенератор. В действительности их два, три и больше; включаются они поочередно.



Так как $Q = Q_1$, то уравнение теплового баланса имеет вид:

$$(i_1 - i_2) + (1 - x)\,\eta_{ад}\,(i_3 - i_4') = x\,(i_1 - i_6) + q_и + q_{нед} \qquad (2.31)$$

Решая это уравнение относительно $x$, получим:

$$x = \frac{\eta_{ад}(i_3 - i_4') + (i_1 - i_2) - (q_и + q_{нед})}{\eta_{ад}\,(i_3 - i_4') + (i_1 - i_6)} \text{ кг/кг} \qquad (2.32)$$

При дросселировании жидкого воздуха от абсолютного давления 6 *кгс/см²* до 1 *кгс/см²* часть его испаряется. По диаграмме *S — T* находим, что в виде жидкости остается $x_{действ} = x \cdot (7—4) : (0—4)$ *кг/кг* (считая, что точка *4* обозначает точку пересечения прямой *0—4* с пограничной кривой пара).

По диаграмме *S — T* (см. рис. 2.5 в Приложении) находим, что линия *6—7* соответствует энтальпии $i_6 = 31{,}5$ *ккал/кг* при $p_2 = 6$ *кгс/см²*. Длина отрезка *0—4* равна *m мм*, длина отрезка *7—4* равна *n мм*, и отношение длин этих отрезков $n/m = 0{,}796$.

По диаграмме *S — T* определяем требуемые величины:

$$i_1 - i_2 = 120{,}6 - 120{,}2 = 0{,}4 \text{ ккал/кг}$$
$$i_1 - i_6 = 120{,}6 - 31{,}5 = 89{,}1 \text{ ккал/кг}$$
$$i_3 - i_4' = 75 - 65 = 10 \text{ ккал/кг}$$

Подставив в уравнение (2.32) вычислительные значения, получим:

$$x = \frac{0{,}8 \cdot 10 + 0{,}4 - 2{,}2}{0{,}8 \cdot 10 + 89{,}1} = \frac{8 + 0{,}4 - 2{,}2}{8 + 89{,}1} = \frac{6{,}2}{97{,}1} = 0{,}064 \text{ кг/кг}$$

или

$$x_{действ} = 0{,}796 \cdot 0{,}064 = 0{,}051 \text{ кг/кг, т. е. } 5{,}1\%$$

Расход энергии на сжатие

$$N_1 = 0{,}0000107 \cdot 29{,}27 \cdot 293 \lg \frac{6}{1} = 0{,}0000107 \cdot 29{,}27 \cdot 293 \cdot 0{,}7782 =$$
$$= 0{,}071 \text{ квт·ч/кг (256 кдж/кг)}$$

Можно также подсчитать возврат энергии турбодетандером.

Теплоперепад в детандере $\Delta i = 8$ *ккал/кг*; $\eta_м = 0{,}98$ — механический к.п.д. детандера. Тогда возврат энергии турбодетандером составит:

$$N_2 = \frac{0{,}98 \cdot 8}{860} = 0{,}009 \text{ квт·ч/кг (32 кдж/кг)}$$

Удельный расход энергии на 1 *кг* жидкого воздуха

$$N_{уд} = \frac{N_1 - N_2}{x_{действ}} = \frac{0{,}071 - 0{,}009}{0{,}051} \approx 1{,}2 \text{ квт·ч} =$$
$$= 4320 \text{ кдж на 1 кг жидкого воздуха}$$

К.п.д. цикла по отношению к идеальному: $\frac{0{,}19}{1{,}2} = 0{,}158$, т. е. 15,8%. Возврат работы турбодетандером составляет:

$$\frac{N_2}{N_1} \cdot 100 = \frac{0{,}009}{0{,}071} \cdot 100 \approx 12{,}7\%$$

Как видно из рис. 2.20, *б* холодильный цикл организован таким образом, что наивыгоднейшее распределение воздуха между детандером и конденсатором происходит самопроизвольно, соответственно холодопотерям. Количество воздуха, поступающее на расширение в турбодетандер, определяется его пропускной способностью при данном давлении и температуре, т. е. холодопроизводительностью установки в целом.

Турбодетандер фактически является основной холодопроизводящей машиной, поскольку в данном цикле холодильным эффектом дросселирования с абсолютного давления $p_2 = 6$ *кгс/см*$^2$ можно пренебречь ввиду его малой величины по сравнению с холодопроизводительностью турбодетандера. Избыток производимого холода, после покрытия потерь через изоляцию и от недорекуперации в регенераторах, идет на сжижение воздуха.

Использование для сжатия и расширения воздуха турбомашин (турбокомпрессора и турбодетандера) с высоким к. п. д. дает возможность создавать на основе этого цикла установки для получения больших количеств жидкого воздуха, жидкого азота или жидкого кислорода значительно бóльшей производительности, чем при использовании поршневых машин. В цикле низкого давления существенно упрощается технологическая схема, облегчается обслуживание, повышаются надежность работы и взрывобезопасность установки.

Применение цикла одного низкого давления (моно-цикла) в установках для получения газообразных продуктов разделения воздуха открыло большие возможности для создания агрегатов высокой производительности. Стоимость кислорода, получаемого на таких установках, настолько снизилась, что стало рентабельным использование его при получении чугуна, стали, многих продуктов химической промышленности и т. д. Таким образом, можно сказать, что в результате осуществления указанного холодильного цикла с применением высокоэффективных турбокомпрессоров и турбодетандеров, регенераторов, а также усовершенствования ряда других аппаратов удалось достигнуть современных масштабов промышленного производства кислорода, азота и аргона.

## 2.5. ПОКРЫТИЕ ХОЛОДОПОТЕРЬ В УСТАНОВКАХ

Выше были рассмотрены основные холодильные циклы для сжижения воздуха. В установках разделения воздуха холодильные циклы используются для покрытия холодопотерь, возникающих при пуске и работе блока разделения воздуха. В процессе получения газообразных продуктов холодопотери слагаются из потерь холода через изоляцию и от недорекуперации. В установках получения жидкого кислорода, жидкого азота или жидкого воздуха к указанным видам холодопотерь добавляется еще потеря холода с отводимым из установки жидким продуктом.



Потери от недорекуперации в основном определяются устройством теплообменников и не зависят от величины аппарата. Наоборот, холодопотери через изоляцию определяются поверхностью кожуха аппарата, толщиной слоя изоляции и ее качеством; эти потери на каждый килограмм перерабатываемого воздуха тем меньше, чем больше величина аппарата, так как количество перерабатываемого воздуха в аппарате увеличивается пропорционально его объему, т. е. кубу линейных размеров, в то время как поверхность, от которой зависят холодопотери в окружающую среду, возрастает пропорционально квадрату этих размеров.

В зависимости от количества воздуха, перерабатываемого установкой, величина удельных холодопотерь через изоляцию составляет:

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Количество воздуха, *м*$^3$/*ч* | 180—200 | 800 | 1500 | 6000 | 30000—40000 | 75000 | 180000 | 200000 |
| Удельные холодопотери через изоляцию, | | | | | | | | |
| *ккал/м*$^3$ воздуха | 3 | 2 | 1,5 | 1,3 | 1,1* | 1,0* | 0,85** | 0,7** |
| *кдж/м*$^3$ воздуха | 12,6 | 8,4 | 6,3 | 5,4 | 4,6 | 4,2 | 3,5 | 2,9 |

* При включении криптоновой колонны потери увеличиваются примерно на 0,2 *ккал/м*$^3$ воздуха.

** С учетом получения криптона и технического кислорода.

Примерно 60% холодопотерь через изоляцию приходится на ректификационные колонны, а 40% — на теплообменные аппараты.

При получении жидких кислорода и азота дополнительное количество холода, отводимое из аппарата вместе со сжиженным газом, составляет около 100 *ккал* (420 *кдж*) на 1 *кг* жидкого продукта. Поэтому в установках для получения жидких кислорода и азота применяются более эффективные циклы, обеспечивающие бóльшие количества холода на каждый килограмм перерабатываемого воздуха.

Холодопотери компенсируются затратой энергии на сжатие воздуха в холодильном цикле до наименьшего, необходимого для этого давления; чем больше холодопотери, тем при более высоком давлении сжатия приходится вести процесс в установках среднего и высокого давления.

Все сказанное относится к установившемуся периоду работы. В пусковой же период основной задачей является быстрейшее охлаждение аппарата и накопление в нем необходимого запаса жидкого воздуха и жидких продуктов разделения (кислорода или азота). В это время желательно получить максимальное количество холода и приходится работать на наибольшем допустимом давлении.

Когда аппарат охлажден и в нем создан запас жидкого воздуха, необходимый для последующего разделения на кислород и азот, рабочее давление воздуха начинают постепенно снижать с тем, чтобы производимый холод покрывал его потери. Установление

теплового равновесия в охлажденном аппарате наблюдают по уровням жидкого воздуха и жидкого кислорода; уровни в этом случае должны оставаться постоянными.

В установках с использованием цикла одного низкого давления для получения газообразных продуктов разделения, увеличение количества холода в пусковой период обеспечивается включением второго (пускового) турбодетандера.

Установки для получения жидкого кислорода, где потери холода с жидким продуктом в 30 раз превышают прочие холодопотери, работают при установившемся процессе и при запуске на одном и том же максимальном давлении, обеспечивающем получение наибольшего количества холода. В этих установках быстрое охлаждение аппарата при пуске достигается за счет большей холодопроизводительности цикла.

Соотношение между холодопроизводительностью цикла и холодопотерями определяется тепловым балансом установки. Тепловой баланс составляют на основе материального баланса и располагаемой холодопроизводительности используемого цикла. Подробнее этот вопрос разобран в следующей главе.

Приведем несколько простейших примеров использования основных уравнений холодильных циклов для определения некоторых величин режима работы установки.

**Пример 1.** Определить максимальное абсолютное давление воздуха при установившемся процессе в агрегате, работающем по циклу с простым дросселированием. Холодопотери через изоляцию $q_и = 2$ *ккал/кг*. Температура поступающего воздуха 30 °С; температура отходящих продуктов разделения (кислорода и азота) 22 °С.

При этих условиях подсчитаем холодопотери от недорекуперации на теплом конце теплообменника:

$$q_{нед} = 0{,}24\,(30 - 22) \approx 1{,}9 \text{ ккал/кг} \approx 8 \text{ кдж/кг}$$

где 0,24 — теплоемкость воздуха, *ккал/(кг·град)*.

Эту же величину можно определить по диаграмме $S - T$ (см. рис. 2.5 в Приложении) как разность теплосодержаний воздуха при абсолютном давлении $p_1 = 1$ *кгс/см²* и температурах 30 и 22 °С:

$$q_{нед} = i_1 - i_1' = 122{,}9 - 121{,}0 = 1{,}9 \text{ ккал/кг} \approx 8 \text{ кдж/кг}$$

Общие холодопотери $q = q_и + q_{нед} = 2 + 1{,}9 = 3{,}9$ *ккал/кг* $\approx$ $\approx 16$ *кдж/кг*. Они покрываются за счет охлаждающего эффекта Джоуля—Томсона, определяемого по разности теплосодержаний воздуха при $T_1 = 303$ °К и абсолютных давлениях $p_2$ и $p_1 = 1$ *кгс/см²*. По уравнению (2.21), принимая $x = 0$ и подставив вместо $i_3$ величину $i_2$, получим холодопроизводительность:

$$Q = i_1 - i_2 = q_и + q_{нед} \text{ ккал/кг}$$

Отсюда

$$i_2 = i_1 - (q_и + q_{нед}) = 122{,}9 - 3{,}9 = 119 \text{ ккал/кг} = 498 \text{ кдж/кг}$$



По диаграмме $S - T$ находим, что при $T_1 = 303$ °К величине $i_2$ соответствует искомое наименьшее абсолютное давление сжатия $p_2 = 80$ *кгс/см²*.

Во время же пуска для ускорения охлаждения аппарата установка работает обычно при давлении 180—200 *кгс/см²*.

**Пример 2.** Определить продолжительность пуска той же установки при следующих условиях: а) компрессор работает при конечном абсолютном давлении 200 *кгс/см²*; б) количество перерабатываемого воздуха $G = 780$ *кг/ч*; в) суммарные холодопотери на охлаждение металлических частей аппарата, изоляции, накопление жидкости в конденсаторе, испарителе и ректификационных колоннах, а также через изоляцию и на недорекуперацию, на весь период пуска аппарата $Q = 70\,000$ *ккал* (293100 *кдж*).

Холодопроизводительность на 1 *кг* воздуха при $T_1 = 303$ °К:

$$q = i_1 - i_2 = 122{,}9 - 114{,}8 = 8{,}1 \text{ ккал/кг} = 34 \text{ кдж/кг}$$

Продолжительность пуска

$$t = \frac{Q}{Gq} = \frac{70\,000}{780 \cdot 8{,}1} = 11{,}1 \text{ ч}$$

**Пример 3.** Подсчитать конечное абсолютное давление сжатия воздуха высокого давления при установившемся процессе цикла с двумя давлениями воздуха и аммиачным охлаждением.

Дано: а) общие холодопотери $q_и + q_{нед} = 3$ *ккал/кг* (12,5 *кдж/кг*); б) температура воздуха после аммиачной установки — 40 °С; в) абсолютное давление воздуха низкого давления $p_2 = 6$ *кгс/см²*; г) количество воздуха высокого давления $M = 20\%$.

По диаграмме $S - T$ при температуре — 40 °С (233 °К) определяем эффект дросселирования с абсолютного давления 6 до 1 *кгс/см²*:

$$\Delta i_T = 106 - 105{,}5 = 0{,}5 \text{ ккал} = 2{,}1 \text{ кдж}$$

на 1 *кг* воздуха низкого давления

Тогда за счет высокого давления требуется из 1 *кг* перерабатываемого воздуха получить холода:

$$q_и + q_{нед} - (1 - M)\,\Delta i_T = 3 - (1 - 0{,}2)\,0{,}5 = 2{,}6 \text{ ккал } (\approx 11 \text{ кдж})$$

из 1 *кг* перерабатываемого воздуха

На 1 *кг* воздуха высокого давления это составит:

$$\Delta i_T' = \frac{2{,}6}{M} = \frac{2{,}6}{0{,}2} = 13 \text{ ккал} \approx 54 \text{ кдж}$$

По диаграмме $S - T$ определяем, что энтальпия 1 *кг* воздуха при $T = 233$ °К и абсолютном давлении $p_1 = 1$ *кгс/см²* равна $i_1 = 106$ *ккал/кг*; при конечном давлении $p_x$ она достигает

$$i_x = i_1 - 13 = 106 - 13 = 93 \text{ ккал/кг} = 389 \text{ кдж/кг}$$

По диаграмме $S - T$ находим, что эту энтальпию при температуре $T = 233$ °К имеет воздух, сжатый до искомого абсолютного давления $p_x = 140$ *кгс/см²*.

Выше были рассмотрены только основные и наиболее простые холодильные циклы. В установках разделения воздуха, в зависимости от назначения и производительности, применяются и более сложные холодильные циклы: используется воздух двух давлений (низкого и высокого); применяется циркуляция потоков воздуха и азота; производится предварительное охлаждение воздуха до различных температур при помощи аммиака и фреона; ступенчатое (каскадное) охлаждение воздуха и др. Такие циклы позволяют снизить удельный расход энергии в воздухоразделительных установках и в большинстве случаев являются комбинацией или видоизменением основных циклов, разобранных выше.

Поскольку получение холода связано с затратой энергии, всякое снижение холодопотерь в воздухоразделительном аппарате приводит к экономии энергии. Следовательно, персонал, обслуживающий воздухоразделительную установку, должен всегда стремиться к максимальному снижению холодопотерь. Для этого необходимо поддерживать наименьшую разность температур между прямым и обратным потоками газов на теплых концах теплообменников, исключить потери холодных паров и жидкости через неплотности в соединениях; не допускать образования на кожухе снеговых пятен, свидетельствующих о промерзании изоляции; следить за тем, чтобы изоляция аппарата была сухой, хорошо уплотненной и не имела пустот.

ГЛАВА 3

# РЕКТИФИКАЦИЯ ВОЗДУХА

## 3.1. ЗАТРАТА ЭНЕРГИИ НА РАЗДЕЛЕНИЕ ВОЗДУХА

Воздух представляет собой смесь азота, кислорода и аргона. Поместив эти газы в чистом виде в количествах, соответствующих содержанию их в воздухе, в общий сосуд, получим смесь, аналогичную по составу атмосферному воздуху, причем смешение газов произойдет само собой, без затраты внешней энергии. Наоборот, последующее разделение смеси на ее составные части (азот, кислород и аргон) уже не может протекать самопроизвольно, а требует расхода энергии. Следовательно, процесс смешения газов является необратимым — он может протекать самопроизвольно только в одном направлении.

Абсолютное давление каждого газа, входящего в состав смеси, *пропорционально содержанию его в смеси.* Если, например, принять, что воздух состоит только из азота и кислорода (аргон относим к азоту), то объемный его состав будет: азота 79,1%, кислорода 20,9%. Тогда абсолютное давление азота и кислорода в воздухе (их *парциальные давления*) соответственно равны 0,791 *кгс/см*$^2$ и 0,209 *кгс/см*$^2$. Для разделения воздуха на кислород и азот нужно каждый из этих газов сжать от его парциального давления до общего давления смеси. Сумма работ на изотермическое сжатие каждого из входящих в смесь газов и является той наименьшей теоретической работой, которая необходима для разделения газовой смеси на ее составные части. Для воздуха при начальной температуре 20 °С (293 °К) эта наименьшая работа составляет 0,014 *квт·ч/м*$^3$ (40,4 *кдж/м*$^3$) воздуха, или 0,067 *квт·ч/м*$^3$ (241,2 *кдж/м*$^3$) кислорода, при полном извлечении последнего из воздуха.

Действительный расход энергии в воздухоразделительных установках намного больше теоретического, так как для предварительного сжижения воздуха перед его разделением на составные части и возмещения потерь холода в этих условиях приходится сжимать воздух в компрессоре до значительно более высоких давлений.

## 3.2. ЖИДКОСТЬ И ПАР

Если жидкость состоит только из одного вещества, то и пары над нею будут содержать только это вещество, например пары воды над водой, пары спирта над спиртом, кислород над чистым жидким кислородом и т. п.

Явление усложняется, когда жидкость состоит из двух или более веществ с разными температурами кипения, способных растворяться одно в другом. В этом случае в паре содержатся те же вещества, что и в жидкости, однако состав его отличается от состава жидкости. Например, в смеси воды и спирта последний более летуч и кипит при более низкой температуре, чем вода. Поэтому при нагревании смеси спирт быстрее испаряется и в паре над жидкостью будет содержаться спирта больше, чем в жидкости.

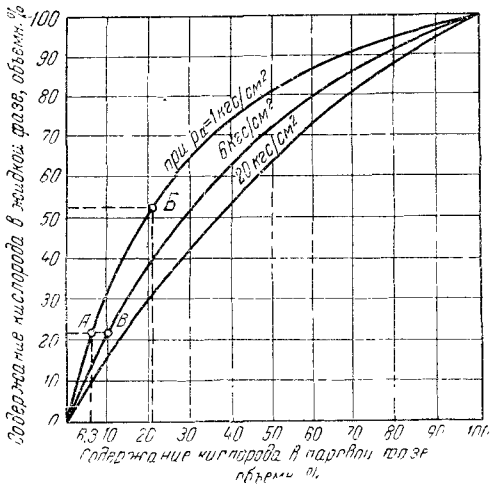



Рис. 3.1. Содержание кислорода в жидкости и паре при разных абсолютных давлениях.

При заданных давлении и температуре и установившемся тепловом равновесии между жидкостью и паром состав пара над жидкостью является совершенно определенным и зависит только от состава жидкости. В этом случае говорят, что пар и жидкость находятся в равновесном состоянии. Нарушение этого равновесия вызывает соответствующие изменения состава жидкой и паровой фаз.

Аналогичные явления происходят при разделении жидкого воздуха на кислород и азот. В процессе нагревания без отвода паров жидкого воздуха из него в первую очередь испаряется азот, который имеет более низкую температуру кипения и поэтому составляет более летучую часть жидкого воздуха. Наряду с азотом, но в меньшей степени, из жидкого воздуха будет испаряться и кислород. Поэтому в жидкости всегда содержится больше кислорода, чем в паре, а в паре — больше азота, чем в жидкости. Другими словами, азот как более летучая часть жидкости переходит в пар в большем количестве, чем кислород, который остается преимущественно в жидкости. Такой переход азота в пар и кислорода в жидкость происходит до тех пор, пока не будет достигнуто равновесное состояние между жидкостью и паром, соответствующее их температуре и давлению.



На рис. 3.1 приведен график зависимости между равновесными содержаниями кислорода в жидкости и паре над нею при разных давлениях. Из графика видно, что при абсолютном давлении, например 1 *кгс/см*², в паре над жидким воздухом, содержащим 21% кислорода, будет только 6,3% кислорода (точка *А*). Для того чтобы содержание кислорода в паре соответствовало его содержанию в атмосферном воздухе, т. е. составляло 21%, необходимо, чтобы в жидкости было около 52% кислорода (точка *Б*). С повышением давления количество кислорода в паровой фазе увеличивается. Например, при абсолютном давлении 6 *кгс/см*² равновесный пар над жидким воздухом содержит уже 10% кислорода (точка *В*). Таким образом, повышение давления, при котором происходит процесс испарения жидкой азото-кислородной смеси, уменьшает различие между составами пара и жидкости.

По мере обогащения кислородом жидкой фазы температура ее кипения повышается; эта температура тем выше, чем выше давление, при котором происходит кипение жидкого воздуха.

Откладывая на горизонтальной оси содержание азота, а на вертикальной — температуру кипения жидкости при постоянном давлении, получают так называемые «рыбки» — температурные диаграммы кипения жидкой азото-кислородной смеси (рис. 3.2).

Нижние кривые показывают изменения состава жидкости при данном давлении в зависимости от температуры, а верхние — изменения состава пара над кипящей жидкостью. Каждая точка кривых соответствует состоянию равновесия между жидкой и паровой фазами при данном давлении и температуре.

Например, паровая фаза при абсолютном давлении 1 *кгс/см*² содержит 79,1% азота и 20,9% кислорода, т. е. соответствует по составу атмосферному воздуху (точка *А*). По диаграмме находим, что в этом случае температура кипения жидкости 81,4 °К (—191,8 °С) и жидкость содержит 48,5% азота и 51,5% кислорода, что соответствует точке *Б* на диаграмме.

Из рис. 3.2 также следует, что отрезок *А—Б* показывает разность содержаний азота в жидкой и паровой фазах; она будет наибольшей, когда в жидкости содержится 30—40% азота и 70—60% кислорода. С повышением давления разность между содержанием азота в жидкости и паре уменьшается, и при критическом давлении она равна нулю, так как в этом случае различие между жидкостью и паром исчезает. Отсюда следует, что процесс разделения воздуха наиболее выгодно вести при возможно более низком давлении, так как в этом случае разность между составами жидкой и паровой фаз будет наибольшей. По этой причине процесс разделения жидких азото-кислородных смесей методом ректификации стремятся проводить при невысоком давлении.

Кривые на рис. 3.2 показывают также, что температура кипения испаряющейся жидкой азото-кислородной смеси по мере обогащения жидкости кислородом постепенно повышается. Последняя капля испаряющейся жидкости имеет температуру кипения жидкого

кислорода, так как азот из нее уже полностью испарился. Кривые равновесия между жидкой и паровой фазами азото-кислородной смеси одни и те же как для испарения, так и для обратного ему процесса конденсации.

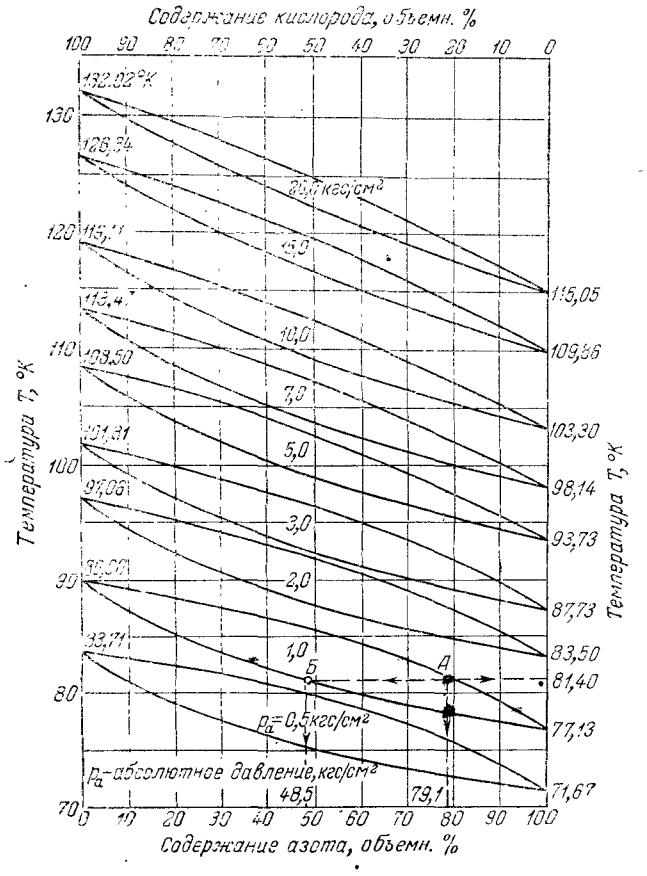



Рис. 3.2. Состав азото-кислородной смеси при разных температурах и абсолютных давлениях.

Жидкость находится в равновесии с паром тогда, когда ее состав соответствует составу пара, образующегося при свободном испарении жидкости. Поэтому, если жидкая фаза содержит азот в большем количестве, чем это следует по условиям равновесия, температура жидкости будет ниже температуры равновесия и начнется преимущественно конденсация кислорода из паровой фазы, сопровождающаяся испарением азота из жидкости.

Наоборот, в случае избытка кислорода в жидкой фазе вследствие того, что парциальное давление азота в ней уменьшено,



происходит преимущественная конденсация азота при одновременном испарении некоторого количества кислорода.

Испаряя жидкий или конденсируя газообразный воздух, можно частично разделить его на кислород и азот. Однако для практического применения такие способы непригодны, так как при этом нельзя получить чистый кислород.

Установлено, что при испарении 60% жидкого воздуха содержание кислорода в остатке жидкости составит всего 35%, а в парах 11,5%. Когда вся жидкость превратится в газообразный воздух, содержание кислорода в нем достигнет 21%; этому будет соответствовать содержание 52% кислорода в последней капле испаряющейся жидкости (см. рис. 3.2). Поэтому простым испарением нельзя разделить воздух на кислород и азот, а можно лишь незначительно обогатить кислородом испаряемую жидкость.

Несколько лучшие результаты получаются при испарении жидкости с одновременным отводом образующихся паров. В этом случае после испарения 9/10 смеси оставшаяся 1/10 часть жидкости будет содержать 86% кислорода, а пар над ней — 60% кислорода. Но такой процесс не выгоден по расходу энергии на 1 $м^3$ кислорода и поэтому не используется для разделения воздуха.

В процессе конденсации воздуха изменяется состав пара и жидкости, как и в случае испарения, но в обратном порядке. Если в начале конденсации газообразный воздух содержал 21% кислорода, в первой капле жидкости будет 52% кислорода. В дальнейшем содержание кислорода в жидкости и паре начинает уменьшаться, и в конце конденсации жидкость будет содержать 21% кислорода, а пар над нею — 6,3% кислорода.

Состав пара и жидкости в процессах разделения азото-кислородных смесей определяют по специальным графикам (номограммам). Такая номограмма, составленная М. Е. Лебедевым, представлена на рис. 3.3 (см. Приложение). По горизонтальной оси отложена температура $T$ в °К, а по вертикальной — объемное содержание азота в паре $N_п$ в % (шкала слева). Крутые наклонные, слегка изогнутые кривые, идущие сверху вниз, соответствуют постоянным абсолютным давлениям $p_a$ в технических атмосферах (*кгс/см²*); шкала давлений нанесена вверху номограммы и для облегчения отсчета повторена в средней части. Наибольшее давление на шкале (20 *кгс/см²*) соответствует крайней правой наклонной кривой; наименьшее абсолютное давление (0,5 *кгс/см²*) — крайней левой наклонной линии. Пологие наклонные кривые на номограмме показывают объемное содержание азота в кипящей жидкости $N_ж$ в %; шкала нанесена с правой стороны номограммы. Схема пользования номограммой приведена на рис. 3.4.

**Пример 1.** Определить состав пара и жидкости, кипящей при 105 °К и абсолютном давлении 6 *кгс/см²*.

Находим точку $A$ пересечения кривой для 6 *кгс/см²* с вертикалью для 105 °К. Проводя через точку $A$ горизонтальную линию $A$ — $Б$, отсчитываем на левой шкале содержание азота в паре 50%, следовательно, и кислорода пар содержит

50%. Точка $A$ оказывается лежащей на пологой кривой, соответствующей 28% азота в жидкости, т. е. жидкость содержит 72% кислорода.

**Пример 2.** Найти температуру кипения при $p_a = 1{,}5$ *кгс/см²* жидкости, содержащей 99% кислорода.

Находим точку $B$ пересечения кривой для давления 1,5 *кгс/см²* с пологой кривой, соответствующей содержанию азота в жидкости 1%. Опустив из точки $B$ вертикаль, найдем температуру кипения жидкости 93,6 °К.

**Пример 3.** Найти состав пара над жидкостью для условий примера 2.

Проводя через точку $B$ горизонталь, получаем на левой шкале содержание азота в паре 3,4%. Следовательно, кислорода в паре содержится 96,6%.

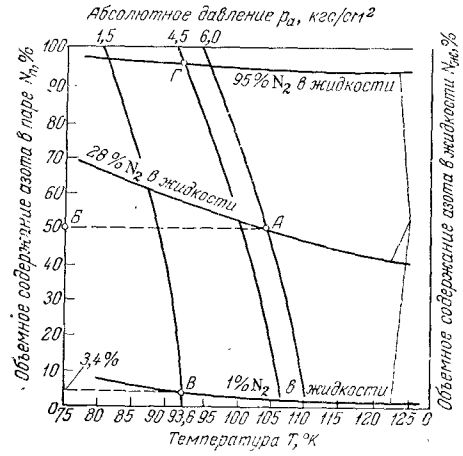



Рис. 3.4. Схема пользования номограммой равновесного состояния азото-кислородной смеси (см. рис. 3.3 в Приложении).

**Пример 4.** При абсолютном давлении 4,5 *кгс/см²* пары содержат 98% азота. Определить содержание азота в жидкости, равновесной с паром.

На кривой для 4,5 *кгс/см²* находим точку пересечения с горизонталью для 98% азота в паре (точка $Г$); она лежит на пологой кривой содержания азота в жидкости 95%.

В расчетах воздухоразделительных аппаратов используется также номограмма $T—p—i—x—y$ для азото-кислородной смеси, составленная Герш и Цеханским (рис. 3.5, см. Приложение). По этой номограмме можно определить абсолютное давление, температуру, энтальпию, содержание азота и кислорода в кипящей жидкости и равновесном с нею паре. Величины энтальпий даны в *ккал/кмоль*, давления — в пределах 0,5—15 *кгс/см²*, температуры — в пределах 75—115 °К. В правой части номограммы расположены линии постоянных давлений (изобары) и линии постоянных концентраций для пара, в левой — для жидкости. Пример определения концентраций пара и жидкости по номограмме для $p_a = 5$ *кгс/см²* и $T = 102$ °К показан на рис. 3.6.

**Пример.** Для температуры $T = 102$ °К проводим горизонталь в обе стороны до кривых, соответствующих давлению $p_a = 5$ *кгс/см²*. Точка пересечения горизонтали с кривой давления в области жидкости соответствует содержанию кислорода в жидкости 66%. Опустив вертикаль на горизонтальную ось, найдем энтальпию жидкости $i = 1750$ *ккал/кмоль*. Выполнив такое же построение в правой части номограммы для области пара, найдем, что при тех же значениях температуры и абсолютного давления в паре содержится 43% кислорода; его энтальпия $i = 2750$ *ккал/кмоль*.

## 3.3. РЕКТИФИКАЦИЯ ВОЗДУХА

Для полного разделения жидкого воздуха на жидкий кислород и газообразный азот применяется процесс **ректификации**, осуществляемый в специальных аппаратах, называемых *ректификационными колоннами*.



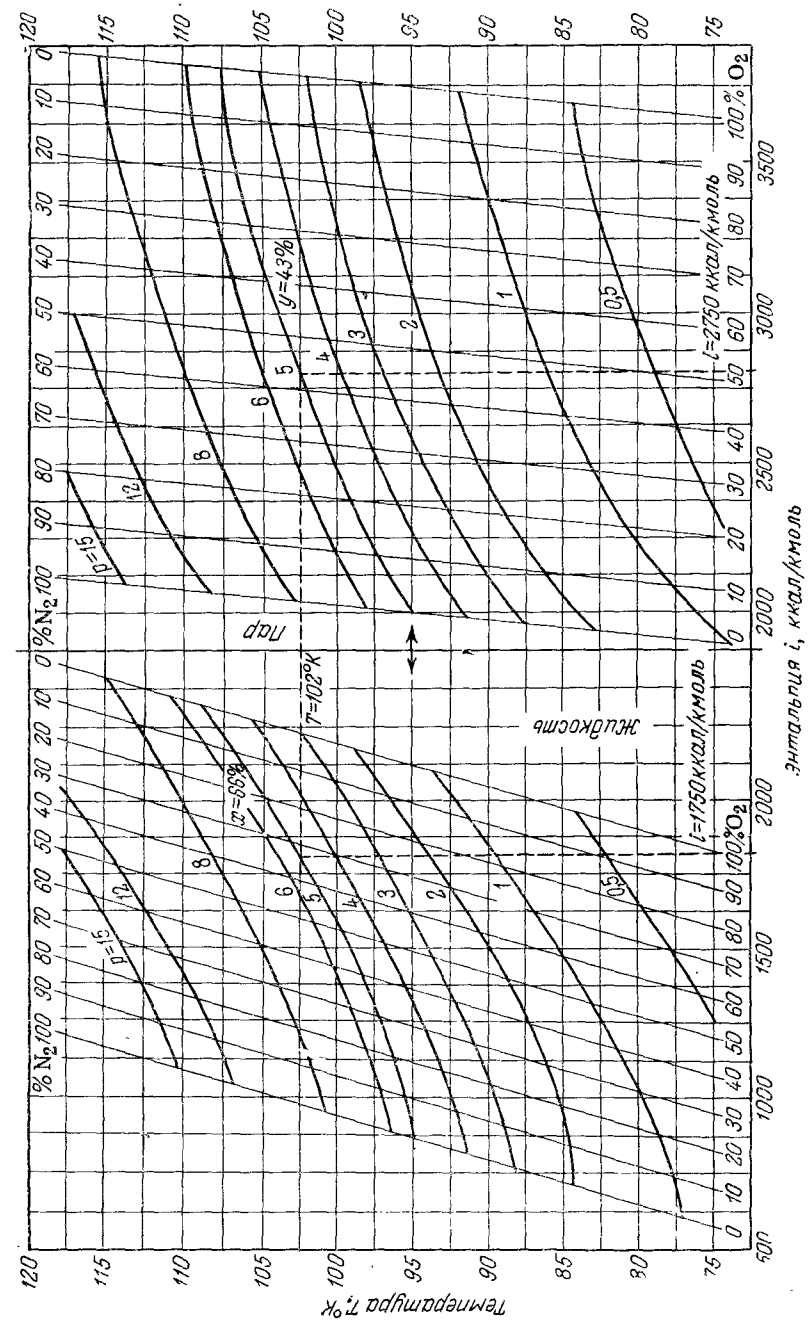



Рис. 3.6. Пример пользования номограммой $T — p — i — x — y$ (см. рис. 3.5 в Приложении).

**Сущность процесса.** Испарение и конденсация — процессы обратимые. При испарении 1 *кг* жидкости затрачивается теплота испарения. При конденсации 1 *кг* полученного пара, в условиях отсутствия потерь теплоты в окружающую среду, выделяется такая же по величине скрытая теплота конденсации.

Проходя через слой жидкой смеси азота и кислорода, последний конденсируется, так как является менее летучим компонентом, чем азот. При этом из жидкости испаряется количество азота, приблизительно равное количеству сконденсировавшегося кислорода.

Наполним сосуд жидким воздухом и пропустим через него по трубке газообразный кислород. Поднимающиеся в жидкости пузырьки пара состоят почти из чистого азота. В этом легко убедиться, поднеся к ним горящую спичку,— пламя быстро погаснет.

На явлении конденсации кислорода в азото-кислородной жидкости с одновременным испарением из нее азота и основан процесс ректификации. Сущность процесса и состоит в том, что образующуюся при испарении жидкого воздуха парообразную смесь азота и кислорода пропускают через жидкость с меньшим содержанием кислорода. Поскольку жидкость содержит меньше кислорода и больше азота, она имеет более низкую температуру, чем проходящий через нее пар. Это вызывает конденсацию кислорода из пара и обогащение им жидкости и одновременно испарение из жидкости азота, т. е. обогащение им паров над жидкостью.

Рассматриваемый процесс происходит при непосредственном соприкосновении пара с жидкостью и повторяется много раз до тех пор, пока не получатся пар, состоящий почти из одного азота, и жидкость, представляющая собой почти чистый жидкий кислород. Такой процесс называется *массообменом*.

Рассмотрим упрощенную схему многократного испарения и конденсации жидкого воздуха (рис. 3.7), воспользовавшись также графиком на рис. 3.2. Для этого принимаем, что воздух представляет собой двойную (бинарную) смесь, т. е. состоит только из кислорода и азота. Пусть имеется несколько сосудов (*I*—*V*) и в верхнем из них находится жидкий воздух, содержащий 21% кислорода.

Предположим, что в сосуде *II* находится жидкость, содержащая 30%, в сосуде *III* — 40%, в сосуде *IV* — 50% и в сосуде *V* — 60% кислорода. Начнем испарять жидкость в сосуде *V* при абсолютном давлении 1 *кгс/см*². В этом случае, как легко определить по рис. 3.2, над жидкостью в сосуде *V*, содержащей 60% кислорода и 40% азота, может находиться равновесный по составу пар, в котором 73,5% азота или 26,5% кислорода, имеющий температуру, равную температуре жидкости в сосуде. Подводим этот пар в сосуд *IV*, где жидкость содержит только 50% кислорода и 50% азота и поэтому является более холодной. Из рис. 3.2 видно, что над этой жидкостью пар может состоять лишь из 81% азота и 19% кислорода, и только в этом случае его температура будет



равна температуре жидкости в данном сосуде. Следовательно, подводимый в сосуд *IV* из сосуда *V* пар, содержащий 26,5% кислорода, имеет более высокую температуру, чем жидкость в сосуде *IV*; поэтому кислород пара конденсируется в жидкости сосуда *IV*, а часть азота из нее будет испаряться. В результате жидкость в сосуде *IV* обогатится кислородом, а пар над нею — азотом.

Из сосуда *IV* пар, в котором 19% кислорода, отводится в сосуд *III*, где жидкость содержит 60% азота, 40% кислорода и имеет более низкую температуру; пар над нею должен состоять из 86% азота и 14% кислорода. Следовательно, пар из сосуда *IV* будет конденсироваться в жидкости сосуда *III*, оставляя в ней часть своего кислорода и испаряя из жидкости азот.

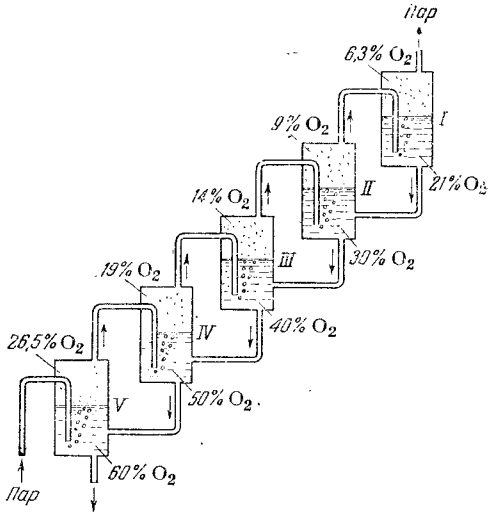



Рис. 3.7. Упрощенная схема процесса многократного испарения и конденсации жидкого воздуха.

Те же рассуждения можно провести для последующих сосудов. При сливе из верхних сосудов в нижние жидкость постепенно обогащается кислородом, конденсируя его из поднимающихся паров и отдавая им свой азот.

Продолжая процесс вверх, можно получить в конце пар, состоящий почти из чистого азота, а спускаясь вниз,— чистый жидкий кислород. В действительности этот процесс происходит много сложнее, чем мы его описали. Тем не менее приведенная схема дает представление о сущности процесса ректификации и способе его осуществления.

Рассмотрим принцип устройства ректификационных колонн.

**Ректификационная колонна.** Такой аппарат представляет собой вертикальную цилиндрическую колонну с расположенными внутри горизонтальными перегородками (тарелками) специального устройства. В небольших колоннах (диаметром до 250 *мм*) иногда вместо тарелок применяется насыпная насадка из отрезков медных или томпаковых трубочек размером 6×6 или 8×8 *мм*, с толщиной стенки 0,1—0,15 *мм*. Жидкая смесь азота и кислорода стекает вниз по тарелкам или насадке, а навстречу ей поднимается смесь паров азота и кислорода. Соприкасаясь на тарелках или насадке с жидкостью, пары отдают кислород, а сами обогащаются азотом, испаряемым из жидкости конденсирующимся в ней кислородом. В результате этого на верху колонны получают

почти чистый газообразный азот, а внизу — жидкость, состоящую почти из чистого кислорода.

**Ректификационная тарелка.** Обычно тарелки подразделяют на ситчатые (рис. 3.8, *а*) и колпачковые (рис. 3.8, *б*).

Ситчатая тарелка изготовляется из листовой латуни, алюминия или нержавеющей стали толщиной 0,8—1 *мм*, в которой в шахматном порядке на расстоянии 3,25 *мм* друг от друга пробиты отверстия диаметром 0,9—1,2 *мм*. На 1 $м^2$ размещается 110 тыс. таких отверстий. Поднимающийся пар легко проходит через отверстия и находящийся на тарелке слой жидкости, вспенивая его. Жидкость под действием подпора пара не протекает через отверстия.

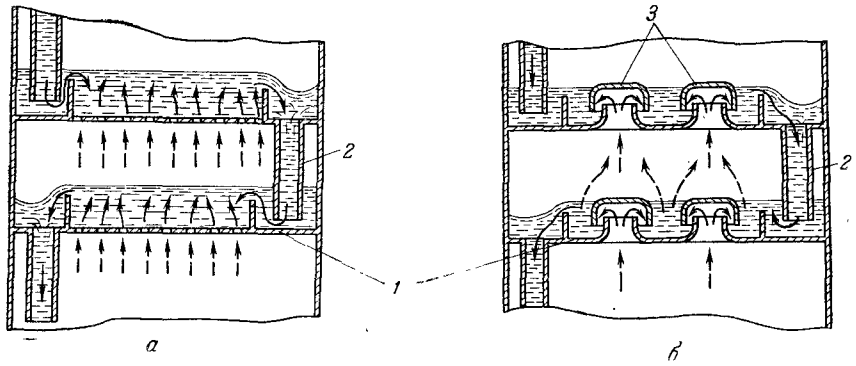



Рис. 3.8. Схемы устройства ректификационных тарелок:
*а* — ситчатая; *б* — колпачковая; *1* — тарелки; *2* — переливные стаканы; *3* — колпачки.

Переливание жидкости с одной тарелки на другую происходит только через сливные стаканы *2*. На тарелках имеются перегородки, высота которых определяет условную высоту слоя жидкости на тарелках.

В колпачковых тарелках имеются отверстия, накрытые колпачками *3*. Пар через эти отверстия поступает под колпачки, выходит через прорези в нижней части колпачков и пробулькивает через слой жидкости, находящийся на тарелке. Мелкие отверстия в сетках и колпачки разделяют поток пара на небольшие струйки для получения максимальной поверхности контакта между паром и жидкостью.

Как уже указывалось, в верхней части колонны на тарелках находятся жидкость и пары, содержащие больше азота и, наоборот, в нижней части колонны на тарелках находятся жидкость и пары, содержащие больше кислорода, но меньше азота. Таким образом, в ректификационной колонне осуществляется процесс непрерывного разделения жидкого воздуха на азот, отводимый из верхней части колонны, и кислород, собирающийся в нижней ее части.



Взаимодействие между паром и жидкостью на тарелке протекает следующим образом. Когда пузырек пара поднимается в жидкости, часть содержащегося в нем кислорода конденсируется и остается в жидкости; взамен этого из жидкости испаряется азот и уносится с парами к следующей тарелке. На каждой тарелке поступающая жидкость обогащается кислородом и отдает азот. Состояние равновесия между паром и жидкостью вначале достигается только на поверхности пузырька, а внутри его состав пара почти не изменяется. Лишь постепенно, по мере перемещения пузырька, дальнейшего дробления его и развития поверхности контакта между паром и жидкостью, средний состав пара над тарелкой будет приближаться к составу, равновесному с составом жидкости на тарелке. Поэтому в действительном процессе пар над жидкостью, вследствие неполного тепло- и массообмена между ними, содержит больше кислорода и меньше азота, чем это должно быть по теоретической кривой равновесия для жидкости данного состава.

*Отношение действительного увеличения содержания более летучего компонента в паре (азота) при прохождении его через тарелку к теоретическому, определяемому по равновесному состоянию, называется коэффициентом обогащения**. Пусть, например, до входа на тарелку пар содержал 50% азота. По кривой равновесия для абсолютного давления 1 *кгс/см*$^2$ содержание азота в паре над жидкостью такого состава должно быть около 81%. В действительности же вследствие несовершенства массообмена на тарелке пары содержат только 60% азота. Тогда коэффициент обогащения, или коэффициент эффективности тарелки, составит:

$$\eta_т = \frac{60-50}{81-50} \approx 0{,}32, \text{ или } 32\%$$

Если состав пара над жидкостью, находящейся на тарелке, соответствует равновесному, то коэффициент обогащения $\eta_т = 1$, и такая тарелка называется *«теоретической»*. Проводя расчет ректификационных колонн, сначала определяют число теоретических тарелок. Так как вследствие ряда причин равновесие пара и жидкости на тарелке не достигается, число фактических тарелок всегда больше, чем теоретических.

*Отношение числа теоретических тарелок* ($n_т$) *к числу фактических тарелок* ($n_ф$) *в колонне называют средним коэффициентом полезного действия тарелки* ($\eta_{т.ср}$), т. е. $\eta_{т.ср} = n_т/n_ф$. Коэффициент $\eta_{т.ср}$ зависит от конструкции тарелки и условий ее работы. Чем меньше этот коэффициент, тем большее число фактических тарелок должна иметь колонна для получения продуктов разделения заданных концентраций. В колоннах воздухоразделительных

* Этот коэффициент называют также *коэффициентом эффективности разделительного действия тарелки*. Для правильно сконструированных ситчатых тарелок коэффициент эффективности находится в пределах 0,6—1,2.

аппаратов действительное число тарелок обычно равно 24—48. В некоторых конструкциях (например, колоннах для извлечения аргона, получения азота высокой чистоты и др.) число тарелок достигает 60—80.

При расчете ректификации воздуха, как бинарной смеси, принимаются следующие значения к.п.д. тарелок:

| | |
|---|---|
| Для нижней колонны | 0,3—0,5 |
| Для верхней колонны | |
| выше места ввода кубовой жидкости | 0,3—0,5 |
| ниже места ввода кубовой жидкости | 0,2—0,3 |

Если при расчете воздух принимается за тройную смесь (т. е. учитывается и аргон), то значения к.п.д. тарелки повышаются до 0,8—1,0.

Увеличивать число тарелок против теоретических приходится потому, что воздух содержит третий компонент — аргон, температура конденсации которого (—185,8 °С) находится между температурами конденсации кислорода и азота. Вследствие этого аргон собирается в основном на тарелках, расположенных в средней части колонны. При получении одного из продуктов высокой концентрации аргон в большем количестве примешивается к отходящему продукту низкой концентрации: при получении чистого кислорода — к отбросному азоту, а при выработке чистого азота — к отбросному кислороду, в котором тогда содержится до 4,3% аргона. Поэтому при расчете процесса ректификации воздуха как бинарной смеси приходится для компенсации влияния аргона увеличивать число тарелок в колонне, принимая для них пониженные значения коэффициента $\eta_{т.ср}$.

Разница между температурами кипения аргона и кислорода (около 3 *град*) меньше, чем между температурами кипения аргона и азота (около 10 *град*); следовательно, разделение кислорода и аргона требует большего числа тарелок, чем разделение азота и аргона. Поэтому в верхних колоннах воздухоразделительных аппаратов двойной ректификации (см. ниже) для тарелок, расположенных выше места ввода кубовой жидкости, принимают более высокие значения среднего к.п.д., чем для тарелок, находящихся ниже ввода кубовой жидкости. Тем самым число действительных тарелок выше этого места увеличивается в меньшей степени, чем число тарелок ниже места ввода кубовой жидкости (по сравнению с числом теоретических тарелок). Когда необходимо получать оба продукта разделения (кислород и азот) высокой концентрации, применяют отбор из средней части колонны так называемой грязной фракции, содержащей основное количество аргона.

Более подробно о влиянии аргона см. гл. 4.

На к. п. д. тарелки влияют два основных фактора: унос капель жидкости поднимающимися парами и характер движения жидкости на тарелке.

Унос жидкости зависит от скорости движения паров в колонне. Для воздухоразделительных аппаратов обычно принимают следующие средние скорости паров, отнесенные к нормальным физическим условиям и номинальному внутреннему диаметру обечайки колонны (*м/сек*):

| | |
|---|---|
| Для нижней колонны | 0,1—0,25 |
| Для верхней колонны | |
| выше места ввода кубовой жидкости | 0,3—0,8 |
| ниже места ввода кубовой жидкости | 0,25—0,5 |



Проходя через слой жидкости на тарелке, пары уносят капельки жидкости на лежащую выше тарелку и тем ухудшают разделение смеси, так как увеличивают содержание кислорода на верхней тарелке, понижая к. п. д. последней. Чем выше скорость паров, тем больше унос жидкости и тем меньше к. п. д. тарелок. Влияние уноса можно снизить увеличив расстояние между тарелками, но при этом возрастает высота колонны.

Жидкость уносится в виде пены или брызг. Пенный унос характерен для небольшой скорости паров, порядка 0,25—0,3 *м/сек*. При бо́льших скоростях унос происходит в виде брызг. Унос тем

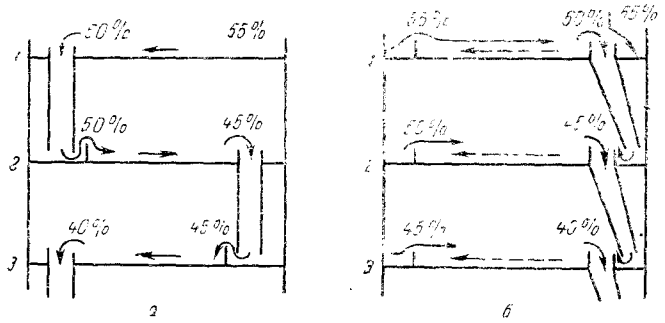



Рис. 3.9. Схема движения жидкости на тарелках:
*а* — в разные стороны; *б* — в одну сторону; *1, 2, 3* — тарелки.

больше, чем выше уровень жидкости на тарелке. Расстояние между тарелками в воздухоразделительных аппаратах обычно равно 50—100 *мм*; при скорости 0,8—1 *м/сек* это расстояние в некоторых колоннах увеличено до 130—150 *мм*. Для уменьшения уноса жидкости над тарелками ставят отбойные устройства или увеличивают диаметр отверстий в ситчатых тарелках (до 1,3 *мм*). Последний способ как достаточно эффективный, позволяющий увеличивать скорость паров без заметного уменьшения к. п. д. тарелок, нашел применение в кислородных аппаратах большой производительности.

Характер движения жидкости на тарелке влияет на равномерность распределения жидкости и пара по поверхности тарелки. Если пар и жидкость на тарелке усиленно и беспорядочно перемешиваются, коэффициент обогащения получается наименьшим, если же движение жидкости на тарелке упорядоченно и происходит в одном направлении, то коэффициент будет наибольший.

Для примера рассмотрим два простейших случая движения жидкости на соседних тарелках.

Когда движение жидкости направлено в разные стороны (рис. 3.9, *а*), тарелка работает только одной стороной. Пусть, например, на тарелку *1* справа поступает жидкость, содержащая 55% $N_2$; предположим, что пока она достигнет сливного стакана

концентрация азота снизится до 50%. Тогда слева на нижней тарелке *2*, куда сливается эта жидкость, состав ее не изменится, а за время движения жидкости по тарелке *2* слева направо количество азота в ней уменьшится, скажем, до 45%. Аналогично на тарелке *3* справа находится жидкость с 45% $N_2$ и слева — 40% $N_2$ и т. д. Таким образом, разность концентрации жидкости на смежных тарелках в этом случае всегда имеется только с одной стороны вследствие чего работает только часть их поверхности.

Иная картина наблюдается, если жидкость на тарелках движется всегда в одном направлении (рис. 3.9, *б*), что можно достичь, например, устройством специальных направляющих каналов по окружности тарелок. Тогда между каждой парой тарелок на всей их поверхности сохраняется постоянная разность концентраций (равная в данном примере 5% $N_2$), которая обусловливает протекание процесса ректификации по всей тарелке. При этом площадь тарелок используется более эффективно и количество их может быть уменьшено. Жидкость на тарелках распределяется более равномерно, вследствие чего унос капель уменьшается, и расстояние между тарелками может быть сокращено.

Теоретически наибольший эффект достигается, когда жидкая и паровая фазы различных концентраций не перемешиваются а частицы пара на своем пути вступают во взаимодействие с соответствующими им по составу и количеству частицами жидкости. Если где-либо в одном месте скапливается большее количество жидкости, чем это требуется для конденсации проходящего в данном месте количества пара, то процесс ректификации нарушается и проходит менее эффективно. Конструкции тарелок, которые в наибольшей степени удовлетворяют этому основному условию и обеспечивают наименьший унос жидкости паром, всегда имеют наиболее высокий к. п. д. По этому принципу построены кольцевые тарелки, получившие широкое распространение. Описание этих тарелок дано в гл. 8.

В колоннах воздухоразделительных установок низкого давления, работающих с регенераторами (см. гл. 4), неравномерность работы тарелок обусловлена также периодическими переключениями регенераторов, вызывающими колебания скорости пара в колонне и связанные с этим изменения количества и высоты уровня жидкости на тарелках. При уменьшении скорости пара в момент переключения регенераторов жидкость накапливается на тарелке а при восстановлении потока пара частично сбрасывается через переливные стаканы на нижнюю тарелку. Такие колебания в работе снижают эффективность тарелки на 10—20%.

**Однократная ректификация.** Схема кислородного аппарата однократной ректификации представлена на рис. 3.10, *а*. Сжатый воздух из компрессора поступает в теплообменник (на схеме не показан), где охлаждается выходящими из аппарата по трубе *3* кислородом и по трубе *9* — азотом. Предварительно охлажденный в теплообменнике воздух по трубе *4* направляется в змеевик *6*,



погруженный в сосуд испарителя (куб) *5* с кипящим жидким кислородом. В змеевике сжатый воздух частично конденсируется и испаряет соответствующее количество кислорода. После змеевика воздух проходит дроссельный вентиль *7*, что снижает избыточное давление до 0,2—0,3 *кгс/см*$^2$ и по трубе *8* подается на верх ректификационной колонны. Часть воздуха при этом испаряется,

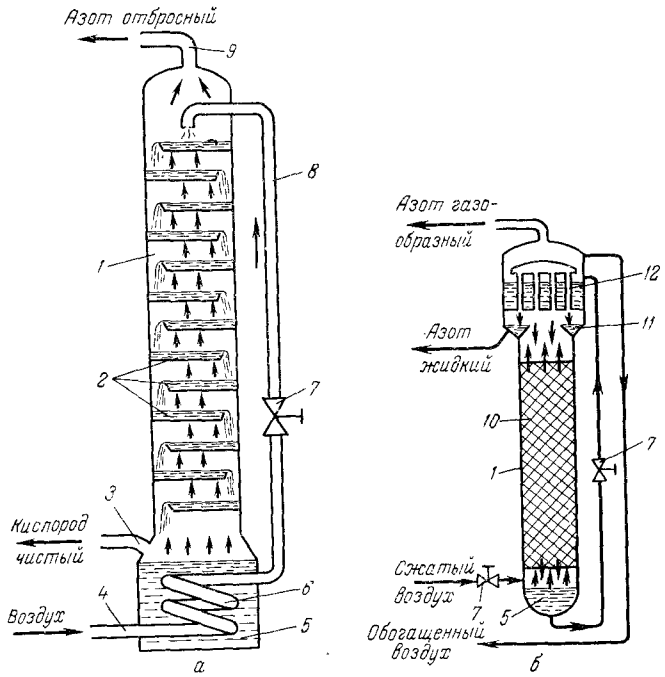



Рис. 3.10. Схемы аппаратов однократной ректификации:

*а* — для получения кислорода; *б* — для получения азота; *1* — ректификационные колонны; *2* — тарелки; *3*, *9* — трубы для отвода кислорода и азота; *4* — труба для подвода сжатого воздуха; *5* — куб колонны; *6* — змеевик испарителя; *7* — дроссельные вентили; *8* — труба для подачи жидкого воздуха на верхнюю тарелку; *10* — насадка (или тарелки); *11* — карманы конденсатора; *12* — конденсатор.

а бо́льшая часть стекает вниз по тарелкам *2*. Этот воздух обогащается кислородом, контактируя на тарелках с поднимающимися парами. В результате в испарителе собирается жидкий кислород, часть паров которого отводится через трубу *3* в качестве продукта. Образующиеся в испарителе и проходящие вверх по колонне пары обогащаются азотом; на верху колонны пар содержит 88—93% азота и 7—12% кислорода. Эта смесь (отбросный азот) по трубе *9* выбрасывается в атмосферу, предварительно пройдя через теплообменник, в котором она охлаждает поступающий сжатый воздух.

Схема азотного аппарата однократной ректификации дана на рис. 3.10, *б*. Сжатый в компрессоре воздух после теплообменника

подается через дроссельный вентиль *7* в куб *5* колонны, откуда через второй дроссельный вентиль *7* поступает в межтрубное пространство конденсатора *12*, для охлаждения и конденсации газообразного азота, собирающегося в трубках конденсатора. Чистый газообразный азот отводится из-под крышки конденсатора, а жидкий азот сливается из карманов *11*. Обогащенный кислородом воздух из межтрубного пространства конденсатора отводится, как и газообразный азот, в межтрубное пространство теплообменника, охлаждая поступающий в колонну сжатый воздух.

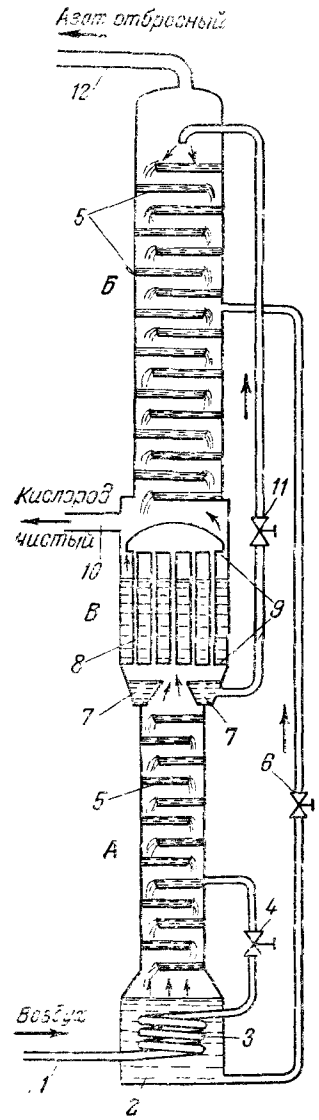



Рис. 3.11. Схема кислородного аппарата двукратной ректификации:

*А* — нижняя колонна; *Б* — верхняя колонна; *В* — конденсатор; *1* — труба для подвода сжатого воздуха из теплообменника; *2* — куб колонны; *3* — змеевик испарителя; *4* — воздушный дроссельный вентиль; *5* — тарелки; *6* — кислородный дроссельный вентиль; *7* — карманы конденсатора; *8* — трубки конденсатора; *9* — трубные решетки конденсатора; *10*, *12* — трубы для отвода газообразных кислорода и азота; *11* — азотный дроссельный вентиль.

При получении технического кислорода аппарат однократной ректификации работает неэкономично, так как вместе с отбросным азотом в атмосферу выбрасывается около 1/3 кислорода, содержавшегося в перерабатываемом воздухе. Обусловлено это тем, что верхняя тарелка орошается жидким воздухом, над которым равновесный по составу пар теоретически должен содержать около 7% кислорода. Для того чтобы уменьшить потери кислорода с отходящим азотом, необходимо верхнюю тарелку орошать не жидким воздухом, а жидким азотом; для этого применяются аппараты двукратной ректификации.

**Двукратная ректификация.** Схема кислородного аппарата двукратной ректификации приведена на рис. 3.11. Этот аппарат состоит из двух ректификационных колонн. В нижней колонне *А* происходит предварительное разделение воздуха на жидкий азот и обогащенную кислородом азото-кислородную смесь. Эти жидкости используются затем для орошения верхней колонны *Б*, в которой воздух окончательно разделяется на кислород и азот.



Сжатый компрессором и охлажденный в теплообменнике (теплообменник на схеме не показан) воздух по трубе *1* поступает в змеевик испарителя *3*. В кубе *2* находится жидкая смесь, состоящая из 45% кислорода и 55% азота. В змеевике *3* воздух конденсируется и через дроссельный вентиль *4* подается в середину колонны *А*. Стекая по тарелкам колонны, жидкий воздух встречается с поднимающимися парами, вследствие чего происходит предварительная ректификация жидкого воздуха.

Между верхней и нижней колоннами расположен конденсатор *В*, состоящий из большого числа вертикальных трубок *8*, концы которых впаяны в горизонтальные трубные решетки *9*. Внутреннее пространство трубок сообщается с нижней колонной, работающей под избыточным давлением 4,5—5,5 *кгс/см*². Это давление в нижней колонне устанавливается самопроизвольно в соответствии с тепловой нагрузкой конденсатора.

При данных составах пара в верхней части нижней колонны и жидкости в конденсаторе количество конденсирующихся паров азота определяется высотой уровня жидкого кислорода между трубками конденсатора (т. е. размером действующей поверхности теплопередачи в конденсаторе) и величиной давления в нижней колонне *А*. Межтрубное пространство конденсатора сообщается с верхней колонной, избыточное давление в которой не превышает 0,5 *кгс/см*²; это давление обусловлено сопротивлением линий отвода продуктов разделения (кислорода и азота) из колонны.

Жидкий кислород заполняет межтрубное пространство конденсатора. Поскольку избыточное давление паров азота составляет около 5 *кгс/см*², а паров кислорода — около 0,5 *кгс/см*², температура конденсации паров азота на несколько градусов превышает температуру жидкого кислорода. Вследствие этого азот конденсируется в трубках конденсатора и стекает в нижнюю колонну, орошая ее насадку, расположенную выше места ввода жидкого воздуха из испарителя, и обеспечивая процесс ректификации на ней.

Остальная часть жидкого азота (концентрация 94—97%) собирается в карманах *7* конденсатора и через азотный дроссельный вентиль *11* подается на орошение верхней тарелки колонны *Б*. В ту же колонну, примерно на уровне 2/3 ее высоты, через кислородный дроссельных вентиль *6* подается жидкая азото-кислородная смесь (кубовая жидкость) из куба *2*. В результате ректификации в верхней колонне, в межтрубном пространстве конденсатора собирается жидкий кислород концентрации 99,5—99,8%. Пары его частично поднимаются вверх по колонне и участвуют в процессе ректификации, а частично отводятся по трубе *10* в теплообменник и затем направляются в газгольдер готового продукта. Азот концентрации 97—98% собирается в верхней части колонны *Б* и по трубе *12* через теплообменник удаляется в атмосферу.

Благодаря тому, что в верхнюю часть колонны аппарата двукратной ректификации подается почти чистый жидкий азот, отходящий азот (при достаточном орошении верхней тарелки) содер-

жит не более 2—3% кислорода. Следовательно, потери кислорода с азотом значительно меньше, чем в аппаратах однократной ректификации, и процесс разделения воздуха при двукратной ректификации более экономичен.

Воздушный дроссельный вентиль ставят после змеевика куба нижней колонны и пропускают через него весь воздух. Конденсируясь в змеевике, воздух одновременно испаряет часть кубовой жидкости, образуя пары для ректификации на тарелках, расположенных ниже уровня ввода воздуха в колонну. Жидкий воздух, стекая вниз, несколько обогащается кислородом (примерно до 45% $O_2$), что соответственно уменьшает количество азота в кубовой жидкости, а это дает возможность увеличить количество азота, подаваемого в верхнюю колонну, и тем улучшить в ней процесс ректификации. Змеевики в кубе колонны устанавливаются только в воздухоразделительных аппаратах небольшой производительности, работающих с использованием воздуха высокого давления.

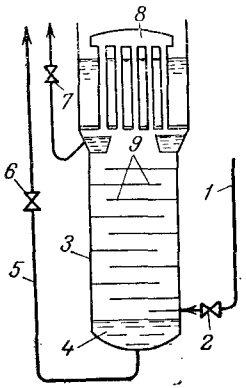



Рис. 3.12. Схема нижней колонны без змеевика в кубе колонны:

*1* — труба для подачи воздуха из теплообменника; *2* — воздушный дроссельный вентиль; *3* — нижняя колонна; *4* — куб нижней колонны; *5* — труба для подачи кубовой жидкости в верхнюю колонну; *6* — кислородный дроссельный вентиль; *7* — азотный дроссельный вентиль; *8* — конденсатор; *9* — тарелки.

Змеевика в кубе колонны может и не быть. В этом случае воздух после теплообменников по трубе *1* (рис. 3.12) поступает к дроссельному вентилю *2*, в котором давление понижается до давления в нижней колонне *3*, а затем непосредственно в куб *4* колонны. При дросселировании воздух частично сжижается и собирается в кубе *4* нижней колонны, образуя жидкость, обогащенную кислородом до 35—39% (см. в разд. 3.5 пример построения графика для расчета числа тарелок в такой колонне). Эта жидкость по трубе *5* подается через кислородный дроссельный вентиль *6* на дальнейшую ректификацию в верхнюю колонну. Туда же подается через азотный дроссельный вентиль *7* жидкий азот из карманов конденсатора *8*. Часть воздуха из куба поднимается в виде пара и подвергается ректификации на тарелках *9* нижней колонны при соприкосновении со стекающей жидкостью.

В крупных аппаратах с циклами низкого давления змеевики в кубе нижней колонны не ставятся. Воздух низкого давления в этом случае сжимается до давления в нижней колонне и вводится в нее над поверхностью жидкости в кубе в состоянии сухого насыщенного пара.

В установках высокого и среднего давления для получения жидкого и газообразного кислорода, работающих по холодильным циклам с использованием детандера, воздух после детандера вводится также непосредственно в куб нижней колонны.



## 3.4. ТЕПЛОВОЙ И МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНСЫ

Рассмотрим тепловой и материальный балансы аппарата двукратной ректификации.

**Тепловой баланс.** Несмотря на то что в процессе ректификации происходит интенсивный теплообмен между газообразной и жидкой фазами разделяемого воздуха, для самого процесса не требуется затраты холода. Если бы не было потерь холода в окружающую среду, то при двойной ректификации пришлось бы даже отводить из аппарата тот излишний холод, который получается при дросселировании воздуха с давления в нижней колонне до давления в верхней колонне. Следовательно, если допустить отсутствие холодопотерь во время установившегося процесса разделения воздуха, то холодильный цикл не требуется.

Процесс разделения в этом случае происходит за счет холода, накопленного в аппарате при его пуске.

При наличии же холодопотерь, вызываемых поступлением внешнего тепла в воздухоразделительный аппарат, накопленная в нем жидкость будет постепенно испаряться и количество ее уменьшаться, что приведет к нарушению процесса ректификации воздуха. Для компенсации холодопотерь и сохранения в аппарате необходимого количества жидкости приходится всегда использовать внешний холодильный цикл.

Таким образом, тепловое равновесие (тепловой баланс) воздухоразделительного аппарата выражается равенством холодопотерь $Q_п$ и холодопроизводительности цикла $Q_{х.ц}$, т. е. $Q_{х.ц} = Q_п$.

Определение холодопроизводительности цикла $Q_{х.ц}$ было рассмотрено в предыдущей главе. Там же указывалось, что холодопотери при установившемся процессе получения газообразного кислорода складываются из потерь через изоляцию $q_и$ и потерь от недорекуперации $q_{нед}$:

$$Q_п = q_и + q_{нед} \text{ ккал/кг воздуха}$$

При получении жидкого кислорода или жидкого азота к этому добавляются потери холода с отводимым жидким продуктом:

$$Q_п = q_и + q_{нед} + q_ж \text{ ккал/кг воздуха}$$

В установках с кислородным насосом для получения газообразного кислорода под давлением, к величине холодопотерь через изоляцию и от недорекуперации добавляют потери холода от работы насоса — $q_{нас}$ (подробнее см. разд. 4.4, описание схемы установки с насосом). Тогда

$$Q_п = q_и + q_{нед} + q_{нас} \text{ ккал/кг воздуха}$$

Обозначим:

*K* и *A* — количество получаемых кислорода и азота заданных концентраций, *кг/ч*;

$i'_K$ и $i'_A$ — энтальпии кислорода и азота при температуре воздуха на входе в теплообменник и давлении выхода кислорода и азота из теплообменника, *ккал/кг*;

$i''_K$ и $i''_A$ — энтальпии кислорода и азота при температуре и давлении выхода их из теплообменника, *ккал/кг*.

Если общее количество воздуха, перерабатываемого в аппарате, составляет $B$ *кг/ч*, то потери холода от недорекуперации:

$$q_{нед} = \frac{K\left(i'_K - i''_K\right) + A\left(i'_A - i''_A\right)}{B} \text{ ккал на 1 кг воздуха} \qquad (3.1)$$

Потерю холода через изоляцию $q_и$ принимают по опытным данным в пределах, указанных в предыдущей главе.

Энтальпии кислорода и азота для разных давлений, концентраций и температур определяют по номограмме $T$—$p$—$i$—$x$—$y$, приведенной на рис. 3.5. При высоких концентрациях можно пользоваться диаграммами $i$—$\lg p$ для кислорода и азота (рис. 3.13 и 3.14, см. Приложение). На этих диаграммах по горизонтальной оси отложены значения энтальпий в *ккал/кг* (*кдж/кг*), а по вертикальной — абсолютные давления $p$ в *кгс/см*$^2$ на логарифмической шкале*; шкала температур дана в °К. Пограничная кривая пара расположена справа, а пограничная кривая жидкости — слева от общей верхней точки, являющейся критической точкой для данного газа.

Зная давление и температуру газа, находят точку пересечения соответствующих им линий на диаграмме $i$—$\lg p$; опустив из этой точки вертикаль на горизонтальную ось, получают значение энтальпии для данного состояния газа. Примеры пользования диаграммами $i$—$\lg p$ даны ниже, в числовых примерах составления теплового баланса воздухоразделительного аппарата.

**Материальный баланс.** Количества поступающих в аппарат кислорода и азота с воздухом равны количествам этих газов, отходящих из аппарата с продуктами разделения.

Зная концентрации получаемого кислорода и азота, можно из уравнения материального баланса определить количество кислорода, получаемое из 1 *м*$^3$ воздуха, поступающего в разделительный аппарат, или количество воздуха, необходимое для получения 1 *м*$^3$ кислорода данной концентрации.

Составим материальный баланс по азоту, обозначив:

$K$ — количество полученного кислорода, *м*$^3$ из 1 *м*$^3$ воздуха;
$A$ — количество полученного азота, *м*$^3$ из 1 *м*$^3$ воздуха;
$y_A$ — содержание чистого азота в азоте, отходящем из аппарата, %;
$y_K$ — содержание чистого азота в кислороде, отходящем из аппарата, %.

Принимаем, что поступающий в разделительный аппарат атмосферный воздух содержит 20,9% кислорода и 79,1% азота (аргон отнесен к азоту).

* Т. е. вместо абсолютных величин давлений на шкале отложены их логарифмы. Этим сокращается длина шкалы и размер диаграммы.



Имеем два уравнения материального баланса для 1 *м*$^3$ перерабатываемого воздуха, а именно:

баланс по количеству воздуха

$$K + A = 1 \qquad (3.2)$$

$A = 1 - K$

баланс по количеству азота

$$y_A A + y_K K = 79{,}1 \qquad (3.3)$$

Решая эти уравнения совместно, находим количество кислорода заданной концентрации, получаемое из 1 *м*$^3$ воздуха:

$$K = \frac{y_A - 79{,}1}{y_A - y_K} \text{ м}^3 \cdot B \qquad (3.4)$$

Расход воздуха на 1 *м*$^3$ получаемого кислорода заданной концентрации:

$$B = \frac{1}{K} \cdot \frac{y_A - y_K}{y_A - 79{,}1} \text{ м}^3 \qquad (3.5)$$

$B = \frac{1}{K} \cdot \frac{y_A - 79{,}1}{y_A - y_K}$

Если, например, $y_A = 96\%$; $y_K = 1\%$, то

$$B = \frac{96 - 1}{96 - 79{,}1} = 5{,}62 \text{ м}^3 \text{ на 1 м}^3 \text{ кислорода}$$

Количество кислорода $K$, получаемое при этом из 1 *м*$^3$ воздуха:

$$K = \frac{1}{B} = \frac{1}{5{,}62} = 0{,}178 \text{ м}^3$$

Как следует из уравнения (3.4), с повышением концентрации азота уменьшаются потери кислорода с отходящим азотом, а производительность аппарата по кислороду увеличивается. Например, при концентрации азота 98% количество получаемого кислорода равно:

$$K = \frac{1}{B} = \frac{98 - 79{,}1}{98 - 1} = \frac{18{,}9}{97} = 0{,}195 \text{ м}^3 \text{ на 1 м}^3 \text{ воздуха}$$

Следовательно, в данном случае повышение чистоты отходящего азота на 2% увеличивает выход кислорода из 1 *м*$^3$ воздуха на

$$\frac{0{,}195 - 0{,}178}{0{,}178} \cdot 100 = 9{,}56\%$$

Поэтому регулирование процесса ректификации в воздухоразделительном аппарате должно быть направлено на достижение наибольшей чистоты отходящего азота для увеличения выхода кислорода.

В табл. 3.1 приведены данные о выходе кислорода из 1 $м^3$ воздуха, а в табл. 3.2— о расходе воздуха на 1 $м^3$ кислорода, подсчитанные для различных концентраций продуктов разделения, выходящих из аппарата.

Таблица 3.1. **Выход кислорода из 1 $м^3$ воздуха в зависимости от концентрации отходящих продуктов (в $м^3$)**

| Концентрация азота, % | При концентрации кислорода | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 100% | 99,5% | 99,0% | 98,5% | 98,0% |
| 100 | 0,209 | 0,210 | 0,211 | 0,212 | 0,213 |
| 99 | 0,201 | 0,202 | 0,203 | 0,204 | 0,205 |
| 98 | 0,193 | 0,194 | 0,195 | 0,196 | 0,197 |
| 97 | 0,184 | 0,185 | 0,186 | 0,187 | 0,188 |
| 96 | 0,176 | 0,177 | 0,178 | 0,179 | 0,180 |
| 95 | 0,167 | 0,168 | 0,169 | 0,170 | 0,171 |

Таблица 3.2. **Расход воздуха на 1 $м^3$ кислорода в зависимости от концентрации отходящих продуктов (в $м^3$)**

| Концентрация азота, % | При концентрации кислорода | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 100% | 99,5% | 99,0% | 98,5% | 98,0% |
| 100 | 4,78 | 4,76 | 4,74 | 4,72 | 4,70 |
| 99 | 4,97 | 4,95 | 4,93 | 4,90 | 4,80 |
| 98 | 5,18 | 5,16 | 5,13 | 5,10 | 5,08 |
| 97 | 5,44 | 5,40 | 5,38 | 5,35 | 5,32 |
| 96 | 5,68 | 5,65 | 5,62 | 5,59 | 5,56 |
| 95 | 5,99 | 5,95 | 5,92 | 5,88 | 5,85 |

Рассмотрим на ряде примеров, как на основе материального и теплового балансов воздухоразделительного аппарата можно рассчитать некоторые параметры процесса разделения воздуха.

**Пример 1.** Определить количество перерабатываемого в 1 *ч* воздуха на кислородной установке. Концентрация продуктов разделения: кислорода 99,5%, азота 96%; производительность установки 100 $м^3/ч$ кислорода. По заданным условиям $y_A = 96$; $y_K = 100-99,5 = 0,5$. Тогда по уравнению (3.5) получим:

$$B = \frac{y_A - y_K}{y_A - 79,1} = \frac{96 - 0,5}{96 - 79,1} = 5,65 \ м^3 \text{ на } 1 \ м^3 \ O_2, \text{ или } 565 \ м^3/ч$$

Масса перерабатываемого воздуха составит:

$$B = 565 \cdot 1,29 = 727 \ кг/ч$$

где 1,29 — плотность воздуха при нормальных физических условиях, $кг/м^3$.

**Пример 2.** Определить количество перерабатываемого в 1 *ч* воздуха для получения 2000 *кг/ч* жидкого кислорода концентрации 98,5% $O_2$ и при содержании в отходящем из аппарата воздухе 17,5% кислорода.

Для этих условий $y_A = 100-17,5 = 82,5\%$; $y_K = 100-98,5 = 1,5\%$. Количество газообразного кислорода при 0 °С и 760 *мм рт. ст.* равно:

$$K = \frac{2000}{1,43} = 1400 \ м^3/ч$$

где 1,43 — плотность кислорода при нормальных физических условиях, $кг/м^3$.

По уравнению (3.5) получим:

$$B = 1400 \cdot \frac{82,5 - 1,5}{82,5 - 79,1} = 33\,300 \ м^3/ч$$



Масса перерабатываемого воздуха составит:

$$B = 33\,300 \cdot 1,29 = 43\,000 \ кг/ч$$

**Пример 3.** Составить тепловой баланс и определить расход энергии на 1 $м^3$ кислорода в установке, работающей по циклу с простым дросселированием.

| | |
|---|---|
| Количество получаемого кислорода (при 0 °С и 760 *мм рт. ст.*), $м^3/ч$ | 100 |
| Количество перерабатываемого воздуха (при 0 °С и 760 *мм рт. ст.*), $м^3/ч$ | 565 |
| Температура поступающего в аппарат воздуха, °С | 30 |
| Разность температур на теплом конце теплообменника, *град* | 5 |
| Абсолютное давление кислорода и азота на выходе из теплообменника, $кгс/см^2$ | 1,2 |

Находим количества воздуха и продуктов разделения (в *кг/ч*):

| | |
|---|---|
| Воздух | $B = 1,29 \cdot 565 = 727$ |
| Кислород | $K = 1,43 \cdot 100 = 143$ |
| Азот | $A = B - K = 727 - 143 = 584$ |

Температура выходящих из теплообменника продуктов разделения:

$$T''_K = T_A = 303 - 5 = 298 \ °K$$

По диаграммам $i$ — $\lg p$ для кислорода и азота (см. рис. 3.13 и 3.14 в Приложении) находим их энтальпии в *ккал/кг* при $p_а = 1,2 \ кгс/см^2$ и температурах 298 и 303 °К:

$$T = 303 \ °K \begin{cases} i'_K = 102,5 \\ i'_A = 103,6 \end{cases}$$

$$T = 298 \ °K \begin{cases} i''_K = 101,2 \\ i''_A = 102,5 \end{cases}$$

Определим потери от недорекуперации:

$$q_{нед} = \frac{143\,(102,5 - 101,2) + 584\,(103,6 - 102,5)}{727} =$$

$$= 1,14 \ ккал \ (4,8 \ кдж) \text{ на } 1 \ кг \text{ воздуха}$$

Потери через изоляцию принимаем $q_и = 1,5$ *ккал* (6,3 *кдж*) на 1 *кг* воздуха.

Общие потери $Q_п = 1,5 + 1,14 = 2,64$ *ккал* (11,1 *кдж* на 1 *кг*. Энтальпия воздуха при $p_а = 1,2 \ кгс/см^2$ и $T = 303$ °К по диаграмме $S$ — $T$ (см. рис. 2.5 в Приложении) равна $i'_B = 122,9$ *ккал/кг*.

Так как установка работает по циклу с простым дросселированием, холодопроизводительность цикла составит:

$$Q_{х.ц} = i'_B - i''_B \ ккал/кг$$

где $i''_B$ — энтальпия воздуха при $T = 303$ °К и давлении $p_2$, равная $i'_B - Q_п = 122,9 - 2,64 = 120,26$ *ккал/кг*.

По диаграмме $S$ — $T$ для воздуха находим, что при $T = 303$ °К этой энтальпии соответствует абсолютное давление $p_2 = 50 \ кгс/см^2$.

Расход энергии составит:

$$N_{\text{з}} = 0{,}0000107RT\lg\frac{p_2}{p_1} = 0{,}0000107\cdot 29{,}27\cdot 303\lg\frac{50}{1} =$$

$$= 0{,}161 \text{ квт·ч (580 кдж) на 1 кг воздуха}$$

или

$$N_{\text{уд}} = \frac{N_{\text{в}}B}{100} = \frac{0{,}161\cdot 727}{100} = 1{,}17 \text{ квт·ч (4212 кдж) на 1 м}^3 \text{ кислорода}$$

**Пример 4**. Определить количество получаемого жидкого кислорода в установке, работающей по холодильному циклу высокого давления с детандером, и расход энергии на 1 *кг* жидкого кислорода.

| | |
|---|---|
| Количество перерабатываемого воздуха (при 0 °С и 760 *мм рт. ст.*), $м^3/ч$ | 565 |
| Температура поступающего в аппарат воздуха, °С | 30 |
| Конечное абсолютное давление сжатия в компрессоре, $кгс/см^2$ | 200 |
| Разность температур на теплом конце теплообменника, *град* | 12 |
| Адиабатический к. п. д. детандера | 0,6 |
| Конечное абсолютное давление расширения в детандере, $кгс/см^2$ | 7 |
| Общее количество полученного кислорода в пересчете на газ (при 0 °С и 760 *мм рт. ст.*), $м^3/ч$ | 100 |
| Количество воздуха (М), поступающего в детандер, на 1 *кг* перерабатываемого воздуха, *кг* | 0,45 |

Находим количества воздуха и продуктов разделения в *кг/ч*:

| | |
|---|---|
| Воздух | $B=1{,}29\cdot 565=727$ |
| Кислород | $K=1{,}43\cdot 100=143$ |
| Азот | $A=B-K=727-143=584$ |

Ввиду того что в установке кислород в основном отводится в жидком виде и эта часть кислорода через теплообменник не проходит, для определения потерь холода от недорекуперации в теплообменнике предварительно примем, что в газообразном виде из аппарата отводится только 20% получаемого кислорода.

Температура выходящих из теплообменника кислорода и азота $T''_A = T''_K = 303-12 = 291$ °К. Принимаем, что абсолютное давление при этом равно 1,2 $кгс/см^2$.

По соответствующим диаграммам $i$ — $\lg p$ имеем:

$$T = 303\ °К \begin{cases} i'_K = 102{,}5 \text{ ккал/кг} \\ i'_A = 103{,}6 \quad » \end{cases}$$

$$T = 291\ °К \begin{cases} i''_K = 99{,}5 \quad » \\ i''_A = 100{,}8 \quad » \end{cases}$$

Потери холода от недорекуперации составят:

$$q_{\text{нед}} = \frac{0{,}2\cdot 143\,(102{,}5-99{,}5) - 584\,(103{,}6-100{,}8)}{727} = 2{,}4 \text{ ккал/кг (10 кдж/кг)}$$



Примем холодопотери через изоляцию

$$q_{\text{и}} = 1{,}5 \text{ ккал/кг (6,3 кдж/кг)}$$

Тогда общие холодопотери составят:

$$Q_{\text{п}} = 1{,}5 + 2{,}4 = 3{,}9 \text{ ккал/кг (16,3 кдж/кг)}$$

Энтальпия жидкого кислорода при абсолютном давлении в конденсаторе разделительного аппарата 1,5 $кгс/см^2$ по диаграмме $i$ — $\lg p$ составляет:

$$i_{K_{\text{ж}}} = 6{,}5 \text{ ккал/кг}$$

Теперь можно определить количество холода, уносимое из аппарата с 1 *кг* жидкого кислорода:

$$q_{K_{\text{ж}}} = i'_K - i_{K_{\text{ж}}} = 102{,}5 - 6{,}5 = 96 \text{ ккал/кг (402 кдж/кг)}$$

Холодопроизводительность цикла составит:

$$Q_{\text{х.ц}} = i'_B - i''_B + M\left(i''_B - i_B\right)\eta_{\text{ад}} \text{ ккал/кг}$$

По диаграмме $S$ — $T$ определим значения энтальпий. Энтальпия воздуха при $T = 303$ °К и абсолютном давлении 1,2 $кгс/см^2$:

$$i'_B = 122{,}9 \text{ ккал/кг}$$

То же при $T = 303$ °К и абсолютном давлении 200 $кгс/см^2$:

$$i''_B = 115 \text{ ккал/кг}$$

То же после адиабатического расширения в детандере до абсолютного давления 7 $кгс/см^2$:

$$i_B = 74{,}8 \text{ ккал/кг}$$

Тогда

$$Q_{\text{х.ц}} = 122{,}9 - 115{,}0 + 0{,}45\,(115 - 74{,}8)\,0{,}60 =$$

$$= 18{,}7 \text{ ккал/кг (78,3 кдж/кг)}$$

Обозначив через $x$ количество жидкого кислорода в *кг*, получаемого на 1 *кг* перерабатываемого воздуха, составим тепловой баланс:

$$Q_{\text{х.ц}} = xQ_{K_{\text{ж}}} + Q_{\text{п}}$$

откуда

$$x = \frac{Q_{\text{х.ц}} - Q_{\text{п}}}{Q_{K_{\text{ж}}}} = \frac{18{,}7 - 3{,}9}{96} = 0{,}154 \text{ кг на 1 кг воздуха}$$

Таким образом, общая производительность установки по жидкому кислороду составит:

$$K_{\text{ж}} = xB = 0{,}154\cdot 727 = 112 \text{ кг/ч}$$

или

$$\frac{112}{143}\cdot 100 = 78{,}4\% \text{ от общего количества получаемого кислорода}$$

Если в теплообменнике аппарата нет кислородной секции, остальной кислород в виде газа примешивается к азоту и уходит вместе с ним в теплообменник.

Фактическое количество жидкого кислорода, сливаемого в цистерну, меньше рассчитанного на величину испарения его при сливе из конденсатора во время дросселирования с абсолютного давления 1,5 до 1 *кгс/см²*. Подсчитаем эти потери по диаграмме $i - \lg p$ для кислорода. Для этого из точки $A$ пересечения левой пограничной кривой жидкости с изобарой (горизонталь) $p_а = 1,5$ *кгс/см²* опустим перпендикуляр на горизонталь, соответствующую давлению $p_а = 1$ *кгс/см²*, как это указано на рис. 3.15. Измеряем по диаграмме длину отрезков $B' - B$ и $B' - B''$. Количество испарившегося кислорода определяется как отношение отрезков

$$\frac{B' - B}{B' - B''} \cdot 100 = 3,3\%$$

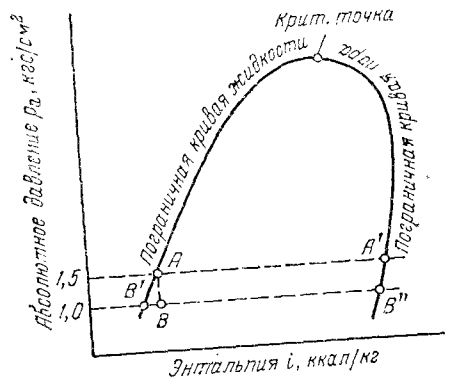



Рис. 3.15. Определение по диаграмме $i - \lg p$ потерь жидкого кислорода на испарение при дросселировании.

На диаграмме $i - \lg p$ вертикаль $A - B$ соответствует процессу дросселирования при $i = \text{const}$; отрезок $B' - B''$ соответствует скрытой теплоте испарения кислорода при абсолютном давлении 1 *кгс/см²*, так же как отрезок $A - A'$ — скрытой теплоте испарения кислорода при 1,5 *кгс/см²*. Следовательно, фактический выход жидкого кислорода составит:

$$\frac{112\,(100 - 3,3)}{100} = 108 \text{ кг/ч}$$

или

$$\frac{108}{143} \cdot 100 = 75,6\%$$ от всего количества получаемого кислорода

Подсчитаем удельный расход энергии. На сжатие 1 *кг* воздуха в компрессоре до абсолютного давления 200 *кгс/см²*, по данным предыдущих примеров, расходуется $N_в = 0,217$ *квт·ч* (774 *кдж*).

Принимая механический к.п.д. детандера $\eta_м = 0,80$, найдем возврат мощности от детандера:

$$N_д = \frac{0,45\,(115 - 74,8)\,0,60 \cdot 0,80}{860} = 0,01 \text{ квт·ч/кг}$$

Удельный расход энергии на 1 *кг* жидкого кислорода составит:

$$N_{уд} = \frac{(0,217 - 0,01)\,727}{108} = 1,4 \text{ квт·ч (5040 кдж)}$$

**Пример 5.** Составить тепловой баланс и определить расход энергии на 1 *кг* жидкого кислорода в установке, работающей по циклу низкого давления с турбодетандером и регенераторами.

| | |
|---|---|
| Производительность по жидкому кислороду, *кг* | 1800 |
| Количество перерабатываемого воздуха, *кг/ч* | 48000 |
| Разность температур на теплом конце регенераторов, *град* | 3 |
| Абсолютное давление воздуха, *кгс/см²* | 6 |
| Температура поступающего воздуха, °С | 20 (293 °К) |



Определим холодопотери. Количество воздуха обратного потока равно:

$$B_{обр} = 48\,000 - 1800 = 46\,200 \text{ кг/ч}$$

Температура воздуха на выходе из регенераторов:
293—3 = 290 °К.

Принимая абсолютное давление воздуха обратного потока на теплом конце регенераторов 1,2 *кгс/см²*, имеем по диаграмме $S - T$ энтальпии воздуха:

прямой поток: $p_1 = 1,2$ *кгс/см²*; $T_2 = 293$ °К; $i'_B = 120,6$ *ккал/кг*;

обратный поток: $p_1 = 1,2$ *кгс/см²*; $T = 290$ °К; $i''_B = 119,9$ *ккал/кг*.

Потери от недорекуперации:

$$q_{нед} = \frac{B_{обр}\left(i'_B - i''_B\right)}{B} = \frac{46\,200\,(120,6 - 119,9)}{48\,000} = 0,674 \text{ ккал/кг (2,8 кдж/кг)}$$

Ввиду того что в данном цикле обратный поток газа имеет состав, близкий к составу воздуха, величину $q_{нед}$ можно подсчитать более точно:

$$q_{нед} = \frac{C_p \cdot \Delta t \cdot B_{обр}}{B} = \frac{0,241 \cdot 3 \cdot 46\,200}{48\,000} = 0,695 \text{ ккал/кг (2,9 кдж/кг)}$$

где $C_p$ — теплоемкость воздуха, *ккал/(кг·град)*;
$\Delta t$ — недорекуперация, *град*.

Потери через изоляцию примем $q_и = 0,75$ *ккал/кг* (3,1 *кдж/кг*).

В предыдущем примере был рассчитан расход холода с жидким кислородом:

$$q_{Кж} = 96 \text{ ккал (402 кдж) на 1 кг кислорода}$$

Таким образом, часовой расход холода в установке составит:

$$Q_ч = B\,(q_и + q_{нед}) + Kq_{Кж} = 48\,000\,(0,75 + 0,695) + 1800 \cdot 96 =$$

$$= 242\,400 \text{ ккал/ч (1 015 000 кдж/ч)}$$

Холодопроизводительность цикла:

$$Q_{х.ц} = B\,[(i'_B - i'''_B) + M\,(i_3 - i'_4)\,\eta_{ад}] \text{ ккал/ч}$$

Температуру перед турбодетандером примем равной 117 °К и адиабатический к.п.д. турбодетандера $\eta_{ад} = 0,8$. По диаграмме $S - T$ имеем:

$$p_а = 6 \text{ кгс/см²};\ T = 293 \text{ °К};\ i'''_B = 120,2 \text{ ккал/кг}$$

$$p_а = 6 \text{ кгс/см²};\ T = 117 \text{ °К};\ i_3 = 76 \text{ ккал/кг}$$

$$p_а = 1,5 \text{ кгс/см²};\ T = 85 \text{ °К};\ i'_4 = 67 \text{ ккал/кг}$$

Тогда количество воздуха, идущего в турбодетандер, можно определить из предыдущего выражения:

$$M = \frac{Q_{х.ц} - B\,(i'_B - i''_B)}{(i_3 - i'_4)\,\eta_{ад}} = \frac{242\,400 - 48\,000\,(120,6 - 120,2)}{(76 - 67)\,0,8} = 31\,000 \text{ кг/ч}$$

Расход энергии на сжатие 1 *кг* воздуха до абсолютного давления 6 *кгс/см²* при к.п.д. турбокомпрессора $\eta_к = 0,7$:

$$N_в = 0,000009 \cdot 29,27 \cdot 293 \lg \frac{6}{1} = 0,06 \text{ квт·ч/кг (216 кдж/кг)}$$

Возврат энергии турбодетандером при механическом к.п.д. его $\eta_м = 0,9$

$$N_д = \frac{0,9\,(76-67)\,0,8}{860} = 0,0075 \text{ квт·ч/кг } (27 \text{ кдж/кг})$$

Удельный расход энергии:

$$N_{уд} = \frac{B \cdot N_в - N_д \cdot M}{K} = \frac{48\,000 \cdot 0,06 - 0,0075 \cdot 31\,000}{1800} =$$

$$= 1,47 \text{ квт·ч } (5292 \text{ кдж}) \text{ на } 1 \text{ кг жидкого кислорода}$$

**Пример 6.** Определить температуру воздуха на выходе из холодного конца теплообменника.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Рабочее давление воздуха, *кгс/см²* | 50 | Концентрация, % кислорода | 99,5 |
| Количество получаемого кислорода, *м³/ч* | 100 | азота | 96 |

Согласно данным примера 3: $B = 727$ *кг/ч*; $K = 143$ *кг/ч*; $A = 584$ *кг/ч*. Температуру воздуха перед теплообменником примем $T'_B = 303$ °К (30 °С).

Энтальпию воздуха на входе в теплообменник при $p_а = 50$ *кгс/см²* и $T'_B = 303$ °К обозначим через $i'_B$ *ккал/кг*. По диаграмме $S - T$ имеем $i'_B = 120,3$ *ккал/кг*.

Принимая давление азота и кислорода на выходе из теплообменника $p_а = 1,2$ *кгс/см²* и температуру $T'_A = T'_K = 298$ °К (недорекуперация равна 5 *град*), определим энтальпии в этих условиях из диаграмм $i - \lg p$ для азота и кислорода: $i'_A = 102,5$ *ккал/кг*; $i'_K = 101,2$ *ккал/кг*. Энтальпии кислорода и азота на холодном конце теплообменника определим исходя из следующих соображений.

Кислород поступает в теплообменник в виде насыщенного пара из парового пространства конденсатора, давление в котором примем равным $p_а = 1,5$ *кгс/см²*. По диаграмме $i - \lg p$ для этого давления кислорода имеем энтальпию сухого насыщенного пара $i''_K = 56,3$ *ккал/кг* и температуру $T''_K = 94,3$ °К. Азот в теплообменник поступает из пространства над верхней тарелкой в виде сухого насыщенного пара при давлении $p_а = 1,5$ *кгс/см²*. По диаграмме $i - \lg p$ для азота $i''_A = 48,5$ *ккал/кг* и $T'_A = 80,7$ °К.

Определения по диаграмме $i - \lg p$ проводим в предположении, что концентрация азота равна 100%. Для концентрации 95% по номограмме Лебедева (см. рис. 3.3 в Приложении) можно найти, что температура азота равна 81,5 °К, что близко к значению, найденному по диаграмме $i - \lg p$.

Составим уравнение теплового баланса теплообменника:

$$Q_K + Q_A = Q_B + Q_и$$

где $Q_K = K(i'_K - i''_K)$ — количество теплоты, получаемое кислородом от воздуха в теплообменнике, *ккал/кг*;

$Q_A = A(i'_A - i''_A)$ — количество теплоты, получаемое азотом от воздуха, *ккал/кг*;

$Q_B = B(i'_B - i''_B)$ — количество теплоты, отдаваемое воздухом в теплообменнике азоту и кислороду, *ккал/кг* (здесь $i''_B$ — энтальпия воздуха на выходе из холодного конца теплообменника, *ккал/кг*);

$Q_и$ — холодопотери через изоляцию теплообменника.

Обычно принимают

$$Q_и = (0,1 - 0,2)\,Bq_и$$



где $q_и$ — общие холодопотери через изоляцию всего аппарата, *ккал* на 1 *кг* воздуха.

Приняв $q_и = 1,5$ *ккал/кг*, составим уравнение материального баланса теплообменника в следующем виде:

$$K(i'_K - i''_K) + A(i'_A - i''_A) = B(i'_B - i''_B) + 0,1q_иB \qquad (3.6)$$

откуда энтальпия воздуха на выходе из холодного конца теплообменника

$$i''_B = (i'_B + 0,1q_и) - \frac{K(i'_K - i''_K) + A(i'_A - i''_A)}{B} = (120,3 + 0,1 \cdot 1,5) -$$

$$- \frac{143\,(101,2 - 56,3) + 584\,(102,5 - 48,5)}{727} = 68,5 \text{ ккал/кг } (287 \text{ кдж/кг})$$

По диаграмме $S - T$ находим, что при давлении $p_а = 50$ *кгс/см²* этому значению энтальпии воздуха соответствует искомая температура воздуха на выходе из холодного конца теплообменника: $T''_B = 145,5$ °К.

**Пример 7.** Составить материальный баланс нижней колонны аппарата двойной ректификации производительностью 100 *м³/ч* кислорода и определить количество жидкости, отбираемое из испарителя (куба) нижней колонны и кармаиов конденсатора.

Содержание кислорода в жидкости испарителя 42% по объему. Содержание азота в жидкости из карманов конденсатора — 95% по объему.

По условиям примера 3 количество перерабатываемого воздуха равно 565 *м³/ч*.

Составим материальный баланс нижней колонны по азоту:

$$K + A = 565 \text{ м³/ч}; \quad y_K K + y_A A = 0,791 \cdot 565$$

откуда находим количество кубовой жидкости, отводимой из испарителя:

$$K = 565 \cdot \frac{y_A - 0,791}{y_A - y_K} = 565 \cdot \frac{0,95 - 0,791}{0,95 - 0,58} = 245 \text{ м³/ч}$$

Количество жидкого азота (в пересчете на газ), отводимого из карманов конденсатора:

$$A = 565 - K = 565 - 245 = 320 \text{ м³/ч}$$

По массе это составит:

жидкого кислорода из испарителя

$$K_ж = 245\,(1,43 \cdot 0,42 + 1,25 \cdot 0,58) = 325 \text{ кг/ч}$$

жидкого азота из карманов конденсатора

$$A_ж = 1,29 \cdot 565 - 325 = 402 \text{ кг/ч}$$

где 1,43 *кг/м³*, 1,25 *кг/м³* и 1,29 *кг/м³* — плотности кислорода, азота и воздуха при 0 °С и 760 *мм рт. ст.*

**Пример 8.** Определить тепловую нагрузку змеевика испарителя нижней колонны для условий примера 6.

Примем величину давления в нижней колонне $p_а = 6$ *кгс/см²*. По номограмме (см. рис. 3.3 в Приложении) находим, что температура жидкости состава 42% $O_2$ и 58% $N_2$ при давлении $p_а = 6$ *кгс/см²* равна $T_ж = 101$ °К.

Температура и давление поступающего в змеевик воздуха, по данным примера 6, составляют $T''_B = 145,5$ °К и $p_а = 50$ *кгс/см²*. При этих условиях энтальпия воздуха $i''_B = 68,5$ *ккал/кг*. Разность температур жидкости испарителя и воз-

духа на выходе из змеевика примем равной 5 *град*. Тогда $T'''_B = T_ж + 5 = 101 + 5 = 106\,°K$.

Количество теплоты, передаваемое в змеевике:

$$Q_{зм} = B\,(i''_B - i'''_B)\ ккал/ч$$

По диаграмме $S - T$ при $T'''_B = 106\,°K$ и $p'_B = 50$ *кгс/см²* находим $i'''_B = 34{,}6$ *ккал/кг*. Подставив значения энтальпий, получим тепловую нагрузку змеевика:

$$Q_{зм} = 727\,(68{,}5 - 34{,}6) = 24\,600\ ккал/ч\ (103\,000\ кдж/ч) \qquad (3.7)$$

По диаграмме $S - T$ определяем, что при 50 *кгс/см²* и 106 °K воздух в змеевике находится в жидком состоянии.

**Пример 9.** Определить количество паров, образующихся при дросселировании воздуха после змеевика нижней колонны, для условий примера 8. Дросселирование происходит по линии постоянной энтальпии $i'''_B = 34{,}6$ *ккал/кг* (144,8 *кдж/кг*).

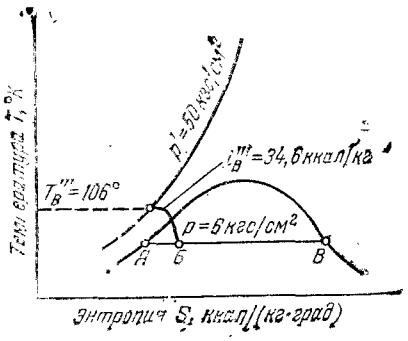



Рис. 3.16. Определение по диаграмме $S - T$ количества пара, образующегося при дросселировании воздуха.

Обозначим:

$B_п$ — количество пара, образующееся при дросселировании, *кг/ч*;

$B_ж$ — количество жидкости, образующееся при дросселировании, *кг/ч*;

$i_п$ — энтальпия пара, *ккал/кг*;

$i_ж$ — энтальпия жидкости, *ккал/кг*.

Уравнение материального баланса:

$$B = B_п + B_ж\ кг/ч,\ или\ B_ж = B - B_п$$

Уравнение теплового баланса:

$$Bi'''_B = B_п i_п + B_ж i_ж$$

Решая совместно оба уравнения, получим:

$$Bi'''_B = B_п i_п + (B - B_п)\,i_ж$$

откуда:

$$B_п = B \cdot \frac{i'''_B - i_ж}{i_п - i_ж}$$

По диаграмме $S - T$ для воздуха при давлении $p_д = 6$ *кгс/см²* и $T_п = T_ж = \sim 100\,°K$ находим значения энтальпий (*в ккал/кг*):

Сухой насыщенный пар . . . . . $i_п = 71{,}3$
Жидкость . . . . . $i_ж = 31{,}4$

Подставив найденные значения, получим

$$B_п = 727 \cdot \frac{34{,}6 - 31{,}4}{71{,}3 - 31{,}4} = 58\ кг/ч$$

$$B_п = \frac{58 \cdot 100}{727} \approx 8\%\ всего\ количества\ дросселируемого\ воздуха$$

Эту же величину можно найти непосредственно по диаграмме $S - T$ для воздуха, пользуясь схемой рис. 3.16, а именно:

$$B_п = B \cdot \frac{отрезок\ А - Б}{отрезок\ А - В} = 58\ кг/ч$$



Количество жидкости после дросселирования:

$$B_ж = B - B_п = 727 - 58 = 669\ кг/ч$$

**Пример 10.** Определить количество паров, поднимающихся из испарителя в нижнюю колонну, и количество флегмы, стекающей в испаритель (для условий примера 8).

Количество паров

$$K_п = \frac{Q_{зм}}{r}\ кг/ч$$

где $Q_{зм} = 24\,600$ *ккал/ч*;

$r$ — скрытая теплота испарения жидкости состава 42% $O_2$ и 58% $N_2$ (по объему) при $p_а = 6$ *кгс/см²*, *ккал/кг*.

Определим величину $r$. Вначале состав жидкости испарителя выразим в весовых процентах

Плотность жидкости данного объемного состава равна:

$$0{,}42 \cdot 1{,}43 + 0{,}58 \cdot 1{,}25 = 1{,}325\ кг/м^3$$

Содержание кислорода в жидкости (в вес. %):

$$\frac{0{,}42 \cdot 1{,}43 \cdot 100}{1{,}325} = 45{,}3$$

То же азота (вес. %):

$$100 - 45{,}3 = 54{,}7$$

По диаграммам $i - \lg p$ кислорода и азота определим скрытые теплоты испарения этих газов при давлении $p_а = 6$ *кгс/см²*:

$$r_K = 57{,}5 - 13{,}9 = 43{,}6\ ккал/кг\ (182{,}5\ кдж/кг)$$

$$r_A = 50{,}4 - 10{,}2 = 40{,}2\ ккал/кг\ (168{,}2\ кдж/кг)$$

Следовательно, скрытая теплота испарения жидкости в испарителе:

$$r = 43{,}6 \cdot 0{,}453 + 40{,}2 \cdot 0{,}547 = 41{,}7\ ккал/кг\ (174{,}5\ кдж/кг)$$

Искомое количество паров, поднимающихся из сосуда испарителя:

$$K_п = \frac{Q_{зм}}{r} = \frac{24\,600}{41{,}7} = 592\ кг/ч$$

Если уровень жидкости в испарителе сохраняется постоянным, то количество флегмы ($K_ф$), стекающей в него с насадки нижней колонны, равно сумме количеств паров ($K_п$), поднимающихся из сосуда испарителя вверх, и кубовой жидкости $K$, отводимой из сосуда через расширительный вентиль в верхнюю колонну. По данным примера 7, количество отводимой кубовой жидкости

$$K = 325\ кг/ч$$

Тогда

$$K_ф = K_п + K = 592 + 325 = 917\ кг/ч$$

**Пример 11.** Для условий предыдущего примера составить материально-тепловой баланс верхней колонны.

Определим, какое количество пара поступает из нижней колонны в конденсатор и какое количество флегмы стекает из конденсатора в нижнюю колонну. Приближенно можно считать, что искомое количество пара ($A_п$), поступающего в конденсатор, равно сумме количеств пара, образующегося при дросселирова-

нии воздуха в нижней колонне ($B_п$), и пара, поднимающегося из испарителя ($K_п$), т. е.

$$A_п = B_п + K_п = 58 + 592 = 650 \text{ кг/ч}$$

Количество флегмы, стекающей из конденсатора в нижнюю колонну, в этом случае:

$$A_ф = A_п - A_ж = 650 - 402 = 248 \text{ кг/ч}$$

где $A_ж = 402$ *кг/ч* — количество жидкости, отводимой из карманов конденсатора (см. пример 7).

Для более точного расчета следует составить тепловой баланс верхней колонны и конденсатора. Покажем на примере, как это делается.

В верхнюю колонну из нижней все продукты поступают в жидком виде и испаряются в верхней колонне теплотой, передаваемой из нижней колонны через конденсатор. Найдя тепловую нагрузку конденсатора, определим количество паров азота, поступающих в конденсатор и конденсирующихся в нем, т. е. получим величину $A_п$.

В примере 6 определено, что температура кислорода в конденсаторе $T_K = T''_K = 94{,}3$ °К. В трубки конденсатора из нижней колонны поступают пары азота концентрации 95% $N_2$ и под абсолютным давлением 6 *кгс/см²*. В этих условиях температура азота (по номограмме рис. 3.3) $T_A = 97$ °К. Разность $\Delta T = T_A - T_K = 97{,}0 - 94{,}3 = 2{,}7$ *град* представляет собой температурный напор в конденсаторе, обеспечивающий передачу теплоты от жидкого кислорода к парам азота.

При расчете конденсаторов более крупных установок необходимо учитывать повышение температуры кипения кислорода в нижних слоях жидкости и уменьшение вследствие этого температурного напора в конденсаторе (так называемая «температурная депрессия», см. гл. 8).

Абсолютное рабочее давление в верхней колонне принимаем 1,5 *кгс/см²*. В верхнюю колонну вносится теплота с жидким азотом из карманов конденсатора, с жидкостью испарителя и через изоляцию.

а) Определим $Q_{A_ж}$ поступающую с жидким азотом из карманов конденсатора, подаваемым на верх верхней колонны.

По диаграмме $i - \lg p$ для азота определяем, что при дросселировании с 6 до 1,5 *кгс/см²* испаряется 17,7% подаваемой жидкости. Кроме того, по этой же диаграмме при абсолютном давлении 1,5 *кгс/см²* находим энтальпии:

жидкого азота — $T_{A_ж} = 80{,}7$ °К; $i_{A_ж} = 1{,}7$ *ккал/кг* (7,1 *кдж/кг*);

газообразного азота — $T_{A_г} = 80{,}7$ °К; $i_{A_г} = 48{,}5$ *ккал/кг* (203,1 *кдж/кг*).

Для упрощения считаем, что из карманов конденсатора в верхнюю колонну подается чистый жидкий азот (а не концентрации 95% $N_2$) и состав его при дросселировании не изменяется. Тогда

$$Q_{A_ж} = A\,(0{,}177\, i_{A_г} + 0{,}823\, i_{A_ж}) =$$

$$= 402\,(0{,}177 \cdot 48{,}5 + 0{,}823 \cdot 1{,}7) = 4020 \text{ ккал/ч } (16\,831 \text{ кдж/ч})$$

б) Определим $Q_{ж.и}$, поступающую с жидкостью испарителя на середину колонны.

Состав жидкости испарителя (см. пример 10): $O_2$ — 42% по объему, или 45,3% по массе; $N_2$ — 58% по объему, или 54,7% по массе.

Примем условно, что при дросселировании этой жидкости до абсолютного давления 1,5 *кгс/см²* состав ее не изменяется, а образующиеся при этом пары имеют равновесный с нею состав*. По номограмме (см. рис. 3.3) определим состав

* В более точных расчетах учитывают обогащение жидкости при дросселировании менее летучим компонентом (кислородом), а ее паров — более летучим (азотом).



пара: 83,5% $N_2$ по объему, или 81,5% по массе и 16,5% $O_2$ по объему, или 18,5% по массе. По номограмме находим также температуру жидкости этого состава и равновесного ей пара при $p_а = 1{,}5$ *кгс/см²*, равную $T_{ж.и} = 84{,}5$ °К. По диаграммам $i - \lg p$ для азота и кислорода находим энтальпии газа и жидкости при этой температуре:

| | *ккал/кг* | *кдж/кг* |
|---|---|---|
| Кислород | | |
| жидкий . . . . . | $i_{K_ж}=3$ | 12,6 |
| газообразный . . . . . | $i_{K_г}=55$ | 230,3 |
| Азот | | |
| жидкий . . . . . | $i_{A_ж}=3{,}8$ | 15,9 |
| газообразный . . . . . | $i_{A_г}=48{,}8$ | 204,3 |

Подсчитаем количество пара, образующегося при дросселировании жидкости испарителя с абсолютного давления 6 *кгс/см²* до 1,5 *кгс/см²* (см. пример 9):

$$K'_п = K\,\frac{i_ж - i_ф}{i_п - i_ф} \text{ кг/ч}$$

где $i_ж$ — энтальпия жидкости состава по массе 45,3% $O_2$ и 54,7% $N_2$, при 6 *кгс/см²*.

По номограмме рис. 3.3 температура этой жидкости при $p_а = 6$ *кгс/см²* равна $T_{ж.и} = 101$ °К. Из диаграммы $i - \lg p$ имеем:

Азот жидкий:

$$T_{ж.и} = 101 \text{ °К}; \quad i_{A_ж} = 12 \text{ ккал/кг } (50{,}2 \text{ кдж/кг})$$

Кислород жидкий

$$p_а = 6 \text{ кгс/см}^2; \quad i'_{K_ж} = 9{,}5 \text{ ккал/кг } (39{,}8 \text{ кдж/кг})$$

Отсюда

$$i_ж = 0{,}453 \cdot 9{,}5 + 0{,}547 \cdot 12 = 10{,}85 \text{ ккал/кг } (45{,}4 \text{ кдж/кг})$$

$i_ф$ — энтальпия флегмы того же состава при $p_а = 1{,}5$ *кгс/см²*. Из предыдущего следует, что для этого давления $T_{ж.и} = 84{,}5$ °К. Тогда

$$i_ф = 0{,}453 \cdot 3 + 0{,}547 \cdot 3{,}8 = 3{,}44 \text{ ккал/кг } (14{,}4 \text{ кдж/кг})$$

$i_п$ — энтальпия пара, равновесного по составу с жидкостью при абсолютном давлении $p_а = 1{,}5$ *кгс/см²*, т. е. 18,5 вес.% $O_2$ и 81,5 вес. % $N_2$.

Тогда

$$i_п = 0{,}185 \cdot 55 + 0{,}815 \cdot 48{,}8 = 50 \text{ ккал/кг } (209{,}3 \text{ кдж/кг})$$

Подставив подсчитанные значения, получим

$$K'_п = 100 \cdot \frac{10{,}85 - 3{,}44}{50 - 3{,}44} = 15{,}9 \approx 16\%$$

Приняв это парообразование, подсчитаем величину $Q_{ж.и}$ по уравнению

$$Q_{ж.и} = K\,[0{,}84\,(0{,}453 \cdot i_{K_ж} + 0{,}547 \cdot i_{A_ж}) + 0{,}16\,(0{,}185 \cdot i_{K_г} + 0{,}815 \cdot i_{A_г})] =$$

$$= 325\,[0{,}84\,(0{,}453 \cdot 3 + 0{,}547 \cdot 3{,}8) + 0{,}16\,(0{,}185 \cdot 55 + 0{,}815 \cdot 48{,}8)] =$$

$$= 3550 \text{ ккал/ч } (14\,863 \text{ кдж/ч})$$

в) определим $Q_и$ — приток теплоты через изоляцию верхней и нижней колонны.

Для нижней колонны его можно принять равным 0,3 $q_и$ *ккал/ч*, а для верхней 0,6 $q_и$ *ккал/ч*. Считая, как и прежде, $q_и = 1,5$ *ккал/кг*, имеем:

$$Q_и = (0,3q_и + 0,6q_и)\,B = 0,9\cdot 1,5\cdot 727 = 980 \text{ ккал/ч } (4103 \text{ кдж/ч})$$

Из верхней колонны продуктами разделения уносится теплоты: газообразным азотом

$$Q_A = A_г\cdot i_{A_г} = 584\cdot 48,8 = 28\,500 \text{ ккал/ч } (119\,323 \text{ кдж/ч})$$

газообразным кислородом:

$$Q_K = K_г\cdot i''_K = 143\cdot 56,3 = 8050 \text{ ккал/ч } (33\,704 \text{ кдж/ч})$$

Через конденсатор передается количество теплоты, равное разности между теплотой, уносимой из верхней колонны, и теплотой, поступающей в нее. Это соответствует тепловой нагрузке конденсатора:

$$Q_{конд} = (Q_A + Q_K) - (Q_{A_ж} + Q_{ж.и} + Q_и) = (28\,500 + 8050) -$$
$$- (4020 + 3550 + 980) = 28\,000 \text{ ккал/ч } (117\,230 \text{ кдж/ч})$$

Это количество теплоты передается конденсирующимися парами азота кислороду, кипящему в межтрубном пространстве конденсатора. По диаграмме $i$ — lg$p$ для азота находим, что при абсолютном давлении 6 *кгс/см²* скрытая теплота испарения (конденсации) для азота $r_A = 40,5$ *ккал/кг*. Таким образом, из нижней колонны в конденсатор поступает количество паров

$$A_п = \frac{Q_{конд}}{r_A} = \frac{28\,000}{40,5} = 692 \text{ кг/ч}$$

а не 650 *кг/ч*, как это было приближенно подсчитано выше. Из этого количества пара в верхнюю колонну отводится $A = 402$ *кг/ч* и стекает обратно в нижнюю колонну в виде флегмы:

$$A_ф = A_п - A = 692 - 402 = 290 \text{ кг/ч}$$

**Пример 12.** Определить, какое количество паров поднимается из конденсатора в верхнюю колонну и какое количество кислородной флегмы стекает в конденсатор при тех же условиях, что и в предыдущих примерах.

Скрытая теплота испарения жидкого кислорода при абсолютном давлении 1,5 *кгс/см²* по диаграмме $i$ — lg$p$ для кислорода $r_K = 50$ *ккал/кг*.

Общее количество образующихся в конденсаторе паров при данной нагрузке конденсатора $Q_{конд} = 28\,000$ *ккал/ч* будет как раз равно количеству флегмы, стекающей в конденсатор из верхней колонны, а именно:

$$K_ф = \frac{Q_{конд}}{r_K} = \frac{28\,000}{50} = 560 \text{ кг/ч}$$

Эта флегма испаряется в конденсаторе, а часть образующихся паров ($K_г = 143$ *кг/ч*) отводится в виде продукта. Следовательно, из конденсатора в верхнюю колонну поступает пара:

$$K''_п = \frac{Q_{конд}}{r_K} - K_г = 560 - 143 = 417 \text{ кг/ч}$$

**Пример 13.** Определить, какое количество пара поднимается с верхней тарелки верхней колонны при тех же условиях, что и в предыдущих примерах



Из колонны отводится общее количество газообразного азота $A_г$, равное сумме количеств паров азота $A''_п$, образующихся при дросселировании жидкости из карманов конденсатора, и искомого количества паров $A'_п$, образующихся на верхней тарелке. Следовательно, $A_г = A'_п + A''_п$, откуда $A''_п = A_г - A'_п$. Подставив числовые значения, получим:

$$A''_п = 584 - 0,177\cdot 402 = 513 \text{ кг/ч}$$

В табл. 3.3 показано (по данным приведенных выше примеров 6—13) распределение давлений, температур и концентраций продуктов разделения воздуха в аппарате двукратной ректификации, используемом в установке, работающей по циклу высокого давления с дросселированием воздуха. Для упрощения, из схемы аппарата исключена вспомогательная аппаратура — переохладители, адсорберы и пр.

Воздух рассматривается как бинарная смесь (21% кислорода и 79% азота), т. е. аргон отнесен к азоту.

**Пример 14.** Составить материально-тепловой баланс установки с кислородным насосом, работающей по циклу высокого давления с дросселированием.

| | |
|---|---|
| Производительность по кислороду, *м³/ч* | 30 |
| Концентрация, % | |
| кислорода | 99,2 |
| азота | 97,5 |
| Температура воздуха на входе в теплообменник, °К | 284 (11 °С) |
| Среднее абсолютное давление кислорода в теплообменнике, *кгс/см²* | 100 |
| Максимальное абсолютное давление кислорода, *кгс/см²* | 165 |

Баланс составим на 1 *м³* перерабатываемого воздуха (при 0 °С 760 *мм рт. ст.*).

Материальный баланс. На 1 *м³* воздуха получится кислорода:

$$K = \frac{97,5 - 79,1}{97,5 - 0,8} = 0,191 \text{ м}^3$$

На 1 *м³* воздуха отводится азота:

$$A = 1 - 0,191 = 0,809 \text{ м}^3$$

На 1 *м³* кислорода расходуется воздуха:

$$B = \frac{1}{0,191} = 5,22 \text{ м}^3$$

В том числе в воздухе:

кислорода $0,191\cdot 5,22 = 1$ *м³*; азота 4,22 *м³*

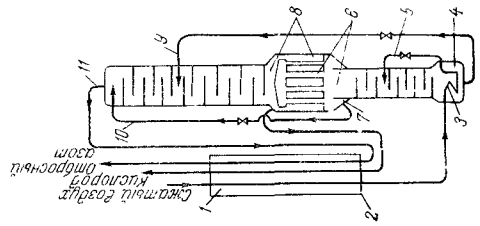
Воздуха поступит в аппарат:

$$B_ч = 30\cdot 5,22 = 157 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Азота отводится:

$$A_ч = 157 - 30 = 127 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Таблица 3.3. **Распределение давлений, концентраций и температур в воздухоразделительном аппарате двукратной ректификации**

| Эскиз аппарата | Позиции | Место и продукт | Состояние | Давление абсолютное, *кгс/см²* | Концентрация, % $O_2$ | Концентрация, % $N_2$ | Температура °C | Температура °K |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  | 1 | Теплообменник, теплый конец | | | | | | |
| | | сжатый воздух | Газ | 50 | 21 | 79 | 30 | 303 |
| | | кислород | » | 1,2 | 99,5 | 0,5 | 25 | 298 |
| | | азот отбросный | » | 1,2 | 4 | 96 | 25 | 298 |
| | 2 | Теплообменник, холодный конец | | | | | | |
| | | сжатый воздух | » | 50 | 21 | 79 | —127,5 | 145,5 |
| | | кислород | » | 1,5 | 99,5 | 0,5 | —178,7 | 94,3 |
| | | азот отбросный | » | 1,5 | 4 | 96 | —191,5 | 81,5 |
| | 3 | Змеевик испарителя | | | | | | |
| | | воздух на входе | » | 50 | 21 | 79 | —127,5 | 145,5 |
| | | воздух на выходе | Жидкость | 50 | 21 | 79 | —167 | 106 |
| | 4 | Куб нижней колонны | | | | | | |
| | | кубовая жидкость | Жидкость | 6 | 42 | 58 | —172 | 101 |
| | | пары | Пары | | 22,6 | 77,4 | | |
| | 5 | Воздух на вводе в нижнюю колонну | Жидкость | 6 | 21 | 79 | —175 | 98 |
| | | | Пары | | 10,5 | 89,5 | | |
| | 6 | Пары из нижней колонны в конденсатор | Пары | 6 | 5 | 95 | —176 | 97 |
| | 7 | Жидкость из конденсатора в нижнюю колонну и карманы | Жидкость | 6 | 5 | 95 | —176 | 97 |
| | 8 | Кислород в конденсаторе | Жидкий | 1,5 | 99,5 | 0,5 | —178,7 | 94,3 |
| | 9 | Кубовая жидкость на вводе в верхнюю колонну | Газообразный | | | | | |
| | | | Жидкость | 1,5 | 42 | 58 | —188,5 | 84,5 |
| | 10 | Азотная жидкость из карманов на вводе в верхнюю колонну | Пары | | 16,5 | 83,5 | | |
| | | | Жидкость | 1,5 | 5 | 95 | —192,3 | 80,7 |
| | 11 | Азот отбросный из верхней колонны | Пары | 1,5 | 1,5 | 98,5 | | |
| | | | Газ | 1,5 | 4 | 96 | —191,5 | 81,5 |

Тепловой баланс. Холодопроизводительность цикла:

$$Q_{х.ц} = q_и + q^A_{нед} + q^K_{нед} + q_{нас}$$

Определим слагаемые теплового баланса для 1 $м^3$ перерабатываемого воздуха:

$$Q_{х.ц} = \left(i'_{284} - i^x_{284}\right)\rho_B \ ккал/м^3$$

При 0 °C и 760 *мм рт. ст.* плотность воздуха $\rho_B = 1{,}29$ $кг/м^3$.

Холодопотери через изоляцию примем $q_и = 2{,}7$ $ккал/м^3$ (11,3 $кдж/м^3$).

Холодопотери от недорекуперации отходящего азота:

$$q^A_{нед} = A \cdot C_p \cdot \Delta t = 0{,}809 \cdot 0{,}311 \cdot 6 = 1{,}51 \ ккал/м^3 \ (6{,}3 \ кдж/м^3)$$

где $C_p = 0{,}311$ $ккал/(м^3 \cdot град)$ — теплоемкость азота;

$\Delta t = 6$ *град* — разность температур входящего воздуха и отходящего азота на теплом конце теплообменника.

Холодопотери от недорекуперации сжатого кислорода:

$$q^K_{нед} = K\rho_K\left(i^1_{284} - i^{100}_{278}\right) = 0{,}191 \cdot 1{,}429\,(108{,}2 - 100{,}9) = 1{,}99 \ ккал/м^3 \ (8{,}3 \ кдж/м^3)$$

где $\rho_K$ — 1,429 — плотность кислорода при 0 °C и 760 *мм рт. ст.*, $кг/м^3$;

$i^1_{284}$ — энтальпия кислорода при абсолютном давлении 1 $кгс/см^2$ и 284 °K;

$i^{100}_{278}$ — энтальпия кислорода при абсолютном давлении 100 $кгс/см^2$ и 278 °K — температуре $T_K$ кислорода на теплом конце теплообменника;

$$T_K = T_B - \Delta t = 284 - 6 = 278 \ °K$$

Значения энтальпий для кислорода определены по диаграмме $S - T$ для кислорода (см. рис. 2.6 в Приложении).

Холодопотери в насосе*:

$$q_{нас} = K\,(m + q_{тр})$$

$m$ — работа на преодоление противодавления сжатого кислорода в змеевике теплообменника (превращается в теплоту), определяется по уравнению

$$m = \frac{1}{427} \cdot pv = \frac{1}{427} \cdot \frac{100 \cdot 10^4}{1190} = 1{,}96 \ ккал \ (8{,}2 \ кдж) \text{ на } 1 \ кг \ O_2$$

где $\frac{1}{427}$ — тепловой эквивалент механической работы, $ккал/(кгс \cdot м)$;

$p = 100 \cdot 10^4$ — среднее абсолютное давление сжатия кислорода, $кгс/м^2$;

$v = \frac{1}{\rho_K} = \frac{1}{1190}$ — удельный объем кислорода в рабочих условиях, $м^3/кг$;

$\rho_K = 1190$ $кг/м^3$ — плотность кислорода в рабочих условиях при температуре

$$T = T^{O_2}_{н.п} - \Delta T_{переохл} = 93 - 8 = 85 \ °K$$

($T^{O_2}_{н.п}$ — температура сухого насыщенного пара кислорода);

* Влияние работы насоса на тепловой баланс установки см. разд. 4.4.

$\Delta T_{\text{переохл}} = 8$ *град* — величина переохлаждения жидкого кислорода перед поступлением его из конденсатора в насос;

$q_{\text{тр}}$ — прочие холодопотери в насосе (от трения, в окружающую среду и др.).

По опытным данным, при абсолютном давлении $p_{\text{сж}} = 100$ *кгс/см²* $q_{\text{тр}} = 4{,}5$ *ккал* (18,8 *кдж*) на 1 *кг* $O_2$

Тогда

$$m + q_{\text{тр}} = 1{,}96 + 4{,}5 = 6{,}46 \text{ ккал на 1 кг } O_2,$$

$$\text{или } 6{,}46 \cdot 1{,}429 = 9{,}2 \text{ ккал } (38{,}5 \text{ кдж}) \text{ на 1 м}^3 \text{ } O_2$$

Следовательно

$$q_{\text{нас}} = 0{,}191 \cdot 9{,}2 = 1{,}76 \text{ ккал/м}^3 \ (7{,}4 \text{ кдж/м}^3)$$

Подставив полученные значения в уравнение теплового баланса, находим:

$$i^{x}_{284} = 112{,}3 \text{ ккал/кг } (460{,}2 \text{ кдж/кг})$$

Этой энтальпии при температуре $T = 284$ °К соответствует абсолютное давление сжатия воздуха в цикле $p = 110$ *кгс/см²*.

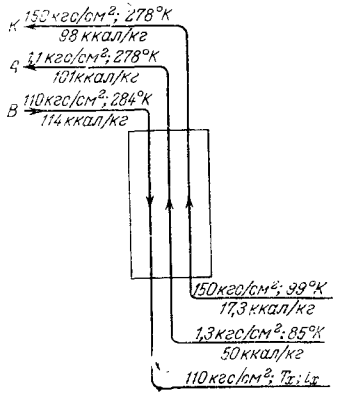



Рис. 3.17. Схема потоков в теплообменнике аппарата с насосом жидкого кислорода (к примеру 15):

*К* — сжатый кислород из насоса; *А* — отходящий азот; *В* — сжатый воздух.

**Пример 15**. Для условий предыдущего примера составить тепловой баланс теплообменника по схеме рис. 3.17.

Температуру кислорода после насоса на входе в теплообменник примем $T_K = 99$ °К. Энтальпию азота находим из диаграммы $i$ — $\lg p$ для азота.

Уравнение теплового баланса теплообменника для 1 *м³* воздуха имеет вид:

$$B\rho_B \left( i^{110}_{284} - i^{110}_{x} \right) + q^{T}_{\text{н}} = A\rho_A \left( i^{1,1}_{278} - i^{1,3}_{85} \right) + K\rho_K \left( i^{150}_{278} - i^{150}_{99} \right) \qquad (3.8)$$

Определяем значения величин, входящих в уравнение.

Холодопотери через изоляцию теплообменника

$$q^{T}_{\text{и}} = 0{,}2 \cdot q_{\text{и}} = 0{,}2 \cdot 2{,}7 = 0{,}54 \text{ ккал/м}^3, \text{ или}$$

$$\frac{0{,}54}{1{,}29} = 0{,}42 \text{ ккал/кг}$$

$$i^{110}_{284} = 114 \text{ ккал/кг}; \quad i^{1,1}_{278} = 101 \text{ ккал/кг}; \quad i^{1,3}_{85} = 50 \text{ ккал/кг}$$

$$i^{150}_{278} = 98 \text{ ккал/кг}; \quad i^{150}_{99} = 17{,}3 \text{ ккал/кг}; \quad \rho_B = 1{,}29 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_A = 1{,}25 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_K = 1{,}429 \text{ кг/м}^3$$



Подставив эти значения в уравнение теплового баланса и решая его относительно $i^{110}_{x}$, находим $i^{110}_{x} = 57{,}5$ *ккал/кг*. Этой энтальпии соответствует температура $T_x = 149{,}5$ °К.

Тепловая нагрузка кислородной секции теплообменника:

$$Q_{\text{к.с}} = K_{\text{ч}}\rho_K \left( i^{150}_{278} - i^{150}_{99} \right) = 30 \cdot 1{,}429\,(98 - 73{,}3) = \\ = 3480 \text{ ккал/ч } (14\,570 \text{ кдж/ч}) \qquad (3 \cdot 9)$$

Тепловая нагрузка азотной секции теплообменника:

$$Q_{\text{а.с}} = A_{\text{ч}}\rho_A \left( i^{1,1}_{278} - i^{1,3}_{85} \right) - B_{\text{ч}} \cdot q^{T}_{\text{и}} = 127 \cdot 1{,}25\,(101 - 50) - \\ - 157 \cdot 0{,}54 = 7935 \text{ ккал/ч } (33\,222 \text{ кдж/ч}) \qquad (3 \cdot 10)$$

**Пример 16**. Составить материально-тепловой баланс воздухоразделительной установки среднего давления с поршневым детандером.

| | |
|---|---|
| Количество перерабатываемого воздуха, *м³/ч* . . . | 720 |
| Начальная температура воздуха, °К . . . . . | 303 |
| Концентрация, % | |
| кислорода . . . . . | 99,5 |
| азота . . . . . | 97 |

Материальный баланс. Количество кислорода, получаемого из 1 *м³* воздуха, определим из уравнения материального баланса:

$$K = \frac{y_A - 79{,}1}{y_A - y_K} = \frac{97 - 79{,}1}{97 - 0{,}5} = 0{,}1865 \text{ м}^3$$

Количество отбросного азота (из 1 *м³* воздуха):

$$A = B - K = 1 - 0{,}1865 = 0{,}8135 \text{ м}^3$$

Часовое количество отбросного азота:

$$A_{\text{ч}} = 0{,}1835 \cdot 720 = 585 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Часовая производительность установки по кислороду:

$$K_{\text{ч}} = 0{,}1865 \cdot 720 = 135 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Приняв потери воздуха на продувки 5%, получим среднечасовую производительность установки (по кислороду)

$$0{,}95 \cdot 135 = 128 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Тепловой баланс. Уравнение общего теплового баланса установки

$$B\Delta i_T + B_{\text{дет}}\Delta i_{\text{дет}} = Q_{\text{п}}$$

Холодопотери через изоляцию:

$$q_{\text{и}} = 2 \text{ ккал/м}^3 \ (8{,}37 \text{ кдж/м}^3)$$

Холодопотери от недорекуперации:

$$q_{\text{нед}} = \Delta T \cdot C^{B}_{p}\,\rho_B = 12 \cdot 0{,}24 \cdot 1{,}29 = 3{,}7 \text{ ккал/м}^3 \ (15{,}49 \text{ кдж/м}^3)$$

где $\Delta T = 12$ *град* — недорекуперация в теплообменнике.

Общие потери холода составят:

$$Q_{\text{п}} = q_{\text{и}} + q_{\text{нед}} = 2 + 3{,}7 = 5{,}7 \text{ ккал/м}^3 \ (23{,}86 \text{ кдж/м}^3)$$

На основании предварительных расчетов принимается рабочее абсолютное давление воздуха в цикле 30 *кгс/см²* и температура воздуха перед детандером 220 °К.

По диаграмме $S - T$ для 1 *кг* воздуха определим адиабатический теплоперепад в детандере:

$$\Delta i_{\text{дет}}^{\text{ад}} = i_{220}^{30} - i_{\text{ад}} = 100,7 - 82,1 = 18,6 \quad \textit{ккал/кг} \ (77,9 \ \textit{кдж/кг})$$

Тепловой перепад в детандере при действительном процессе и адиабатическом к.п.д. детандера $\eta_{\text{ад}} = 0,6$ составит

$$\Delta i_{\text{дет}} = \eta_{\text{ад}} \Delta i_{\text{дет}}^{\text{ад}} = 0,6 \cdot 18,6 = 11,16 \ \textit{ккал/кг} \ (46,7 \ \textit{кдж/кг})$$

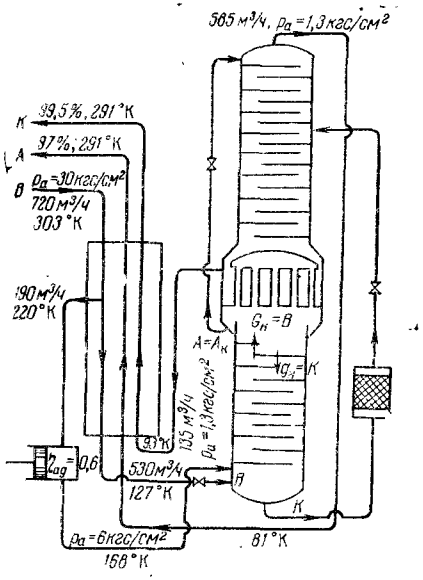



Рис. 3.18. Схема колонны (к примеру 16).

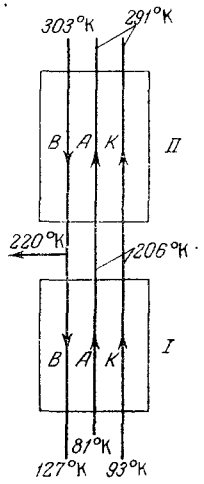



Рис. 3.19. Схема теплообменника (к примеру 16):

*I, II* — соответственно нижняя и верхняя части теплообменника.

Энтальпия и температура воздуха после детандера составят:

$$i_{\text{дет}} = i_{220}^{30} - \Delta i_{\text{дет}} = 100,7 - 11,16 = 89,54 \quad \textit{ккал/кг} \ (374,9 \ \textit{кдж/кг})$$

$$T_{\text{дет}} = 168 \ °\text{K} \ (\text{по диаграмме } S - T)$$

Эффект дросселирования

$$\Delta i_T = i_{303}^{1} - i_{303}^{30} = 122,9 - 121,5 = 1,4 \quad \textit{ккал/кг} \ (5,86 \ \textit{кдж/кг})$$

Подставив эти значения в общий тепловой баланс, получим:

$$B \cdot 1,29 \cdot 1,4 + B_{\text{дет}} \cdot 1,29 \cdot 11,16 = 5,7$$



откуда количество детандерного воздуха:

$$B_{\text{дет}} = \frac{5,7 - B \cdot 1,29 \cdot 1,4}{1,29 \cdot 11,16} = 0,27 \ \textit{м}^3 \text{ на } 1 \ \textit{м}^3 \text{ воздуха}$$

Количество воздуха, поступающего на дросселирование:

$$B_{\text{др}} = 1 - B_{\text{дет}} = 1 - 0,27 = 0,73 \ \textit{м}^3 \text{ на } 1 \ \textit{м}^3 \text{ воздуха}$$

или в час:

$$\text{на детандер } B_{\text{дет}} = 0,27 \cdot 720 = 190 \ \textit{м}^3/\textit{ч}$$

$$\text{на дросселирование } B_{\text{др}} = 720 - 190 = 530 \ \textit{м}^3/\textit{ч}$$

Тепловой баланс колонны (рис. 3.18) выражается следующим уравнением:

$$\rho_B \cdot B_{\text{др}} \cdot i_x + \rho_B \cdot B_{\text{дет}} \cdot i_{\text{дет}} + q_{\text{н}}^{\text{кол}} = \rho_B \cdot B \cdot i_{\text{общ}}$$

здесь $i_{\text{общ}}$ — суммарная энтальпия азота и кислорода, выходящих из колонны в состоянии сухого насыщенного пара при $p_{\text{а}} = 1,3$ *кгс/см²* (эта величина соответствует энтальпии сухого насыщенного пара воздуха при том же абсолютном давлении 1,3 *кгс/см²*).

По диаграмме $S - T$ определим:

$$i_{\text{общ}} = 69,2 \quad \textit{ккал/кг} \ (288,7 \ \textit{кдж/кг})$$

Холодопотери через изоляцию колонны:

$$q_{\text{н}}^{\text{кол}} = 1,2 \quad \textit{ккал/м}^3 \ (5 \ \textit{кдж/м}^3)$$

Подставив эти значения в уравнение теплового баланса колонны, получим:

$$1,29 \cdot 0,73 \cdot i_x + 1,29 \cdot 0,27 \cdot 89,54 + 1,2 = 1,29 \cdot 69,2$$

откуда $i_x = 60,6$ *ккал/кг* (253,7 *кдж/кг*), что соответствует влажному пару при $T_B = 127$ °К — температуре воздуха перед дроссельным вентилем воздуха.

Из диаграмм $i - \lg p$ для азота и кислорода при абсолютном давлении 1,3 *кгс/см²* на выходе их из колонны в состоянии сухого насыщенного пара определим температуры этих газов:

$$T_K = 93 \ °\text{K}, \qquad T_A = 81 \ °\text{K}$$

Тепловой баланс нижней части теплообменника (рис. 3.19) выражается следующим уравнением:

$$\rho_B \cdot B_{\text{др}} \left( i_{220}^{30} - i_{127}^{30} \right) + q_{\text{н}}^{\text{т.н}} = \rho_A \cdot A \left( i^A - i_{81}^A \right) + \rho_K K \left( i^K - i_{93}^K \right)$$

Примем холодопотери через изоляцию нижней части теплообменника $q_{\text{н}}^{\text{т.н}} = 0,5$ *ккал/м³* (2,09 *кдж/м³*). Поскольку уравнение теплового баланса содержит два неизвестных — энтальпии азота и кислорода на выходе из нижней части теплообменника, для их определения задаемся температурой обратных газов в этом месте. Принимаем $T_{\text{н}}^A = T_{\text{н}}^K = 206$ °К с тем, чтобы в этом месте разность температур между воздухом и обратными газами была несколько больше разности между ними на выходе из верхней части теплообменника, равной 303—291 = 12 *град*; получим 220—206 = 14 *град*.

По диаграммам $S - T$ и $i - \lg p$ находим значения энтальпий:
воздуха

$$i^{30}_{220} = 100,7 \text{ ккал/кг}; \qquad i^{30}_{127} = 60,6 \text{ ккал/кг}$$

азота

$$i^{A} = i^{1,2}_{206} = 79 \text{ ккал/кг}; \qquad i^{A}_{81} = i^{1,2}_{81} = 48 \text{ ккал/кг}$$

кислорода

$$i^{K} = i^{1,2}_{206} = 81,5 \text{ ккал/кг}; \qquad i^{K}_{93} = i^{1,2}_{93} = 56,5 \text{ ккал/кг}$$

Подставив полученные значения в уравнение теплового баланса, находим:

$$1,29 \cdot 0,73\,(100,7 - 60,6) + 0,5 = 1,25 \cdot 0,8135\,(79 - 48) + \\ + 1,43 \cdot 0,1865\,(81,5 - 56,5)$$

или

$$38,5 = 31,6 + 6,65, \text{ т. е. } 38,5 \approx 38,25 \text{ — совпадение достаточно близкое}$$

Определение тепловых нагрузок кислородной и азотной секций нижней части теплообменника. Ввиду более высокой температуры кислорода на входе в секцию ($T_K = 93$ °К), чем азота ($T_A = 81$ °К), разность температур в кислородной секции получается меньшей, чем в азотной. Для увеличения этой разности примем энтальпию воздуха на выходе из секции $i_B = 62,7$ *ккал/кг*, т. е. несколько выше средней энтальпии воздуха. При этом количество теплоты, передаваемое воздухом в кислородной секции, равно:

$$q^{K}_{B} = x_K\,(100,7 - 62,7)\,1,29 = x_K \cdot 49,1 \text{ ккал/м}^3$$

Примем холодопотери через изоляцию:
кислородной секции — 0,4 *ккал/м³* (1,67 *кдж/м³*)
азотной секции — 0,1 *ккал/м³* (0,42 *кдж/м³*)

Количество теплоты, получаемое кислородом:

$$q_K = K \cdot \rho_K \left( i^{1,2}_{206} - i^{1,2}_{93} \right) = 0,1865 \cdot 1,43\,(81,5 - 56,5) = \\ = 6,7 \text{ ккал/м}^3 \ (28,05 \text{ кдж/м}^3)$$

Тепловая нагрузка кислородной секции с учетом холодопотерь:

$$Q_K = B\,(6,7 - 0,4) = 720 \cdot 6,3 = 4536 \text{ ккал/ч} \ (18\,991 \text{ кдж/ч})$$

Количество воздуха, направляемого в кислородную секцию:

$$x_K = \frac{6,3}{49,1} = 0,129 \text{ м}^3 \text{ на } 1 \text{ м}^3 \text{ воздуха,}$$

$$\text{или } 0,129 \cdot 720 = 93 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Теплота, передаваемая воздухом в азотной секции:

$$q^{A}_{B} = x_A\,(100,7 - 60,6)\,1,29 = x_A \cdot 40,1 \cdot 1,29 = x_A \cdot 52 \text{ ккал/м}^3$$

Количество теплоты, получаемое азотом:

$$q_A = A\rho_A \left( i^{1,2}_{206} - i^{1,2}_{81} \right) = 0,8135 \cdot 1,25\,(79 - 48) = 31,6 \text{ ккал/м}^3$$



или с учетом холодопотерь:

$$31,6 - 0,1 = 31,5 \text{ ккал/м}^3 \ (132 \text{ кдж/м}^3)$$

Тепловая нагрузка азотной секции:

$$Q_A = B \cdot q'_A = 720 \cdot 31,5 = 22\,600 \text{ ккал/ч} \ (94\,622 \text{ кдж/ч})$$

Количество воздуха, направляемого в азотную секцию:

$$x_A = \frac{31,5}{52} = 0,607 \text{ м}^3 \text{ на } 1 \text{ м}^3 \text{ воздуха, или } 0,607 \cdot 720 = 437 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Теплосодержание воздуха на выходе из азотной секции определим из равенства:

$$0,607 \left( 100,7 - i^{B}_{x} \right) 1,29 + 0,1 = 31,6$$

откуда

$$i^{B}_{x} = \frac{0,607 \cdot 1,29 \cdot 100,7 - 31,6}{0,607 \cdot 1,29} = 59,6 \text{ ккал/кг}$$

При этих условиях воздух находится частично (около 37%) в сжиженном состоянии.

Тепловой баланс верхней части теплообменника (см. рис. 3.19) выражается следующим уравнением:

$$B \cdot \rho_B \left( i^{30}_{303} - i^{30}_{220} \right) + q^{\text{т.в}}_{\text{и}} = \rho_A \cdot A \left( i^{A}_{291} - i^{A}_{206} \right) + \rho_K \cdot K \left( i^{K}_{291} - i^{K}_{206} \right)$$

Из диаграмм находим значения энтальпий:
воздуха

$$i^{30}_{303} = 121,5 \text{ ккал/кг}; \qquad i^{30}_{220} = 100,7 \text{ ккал/кг}$$

азота

$$i^{A}_{291} = i^{1}_{291} = 100,2 \text{ ккал/кг};$$

$$i^{A}_{206} = i^{1,2}_{206} = 79,9 \text{ ккал/кг}$$

кислорода

$$i^{K}_{291} = i^{1}_{291} = 99,5 \text{ ккал/кг}; \qquad i^{K}_{206} = i^{1,2}_{206} = 81,5 \text{ ккал/кг}$$

Холодопотери через изоляцию: $q^{\text{т.в}}_{\text{и}} = 0,3$ *ккал/м³*. Подставив в уравнение баланса, получим при $B = 1$ *м³/м³*:

$$1,29\,(121,5 - 100,7) + 0,3 = 1,25 \cdot 0,8135\,(100,2 - 79,9) + \\ + 1,43 \cdot 0,1865\,(99,5 - 81,5),$$

$$\text{или } 27,2 \approx 26,3 \text{ (расхождение в 2\% допустимо)}$$

Тепловая нагрузка азотной секции:

$$Q_A = A \cdot \rho_A \left( i^{1}_{291} - i^{1,2}_{206} \right) = 585 \cdot 1,25\,(100,2 - 79,9) = \\ = 15\,500 \text{ ккал/ч} \ (64\,895 \text{ кдж/ч})$$

Тепловая нагрузка кислородной секции:

$$Q_K = K \cdot \rho_K \left( i^{1}_{291} - i^{1,2}_{206} \right) = 135 \cdot 1,43\,(99,5 - 81,5) = \\ = 3440 \text{ ккал/ч} \ (14\,402 \text{ кдж/ч})$$

Определение поверхности теплообменника производится по формулам теплопередачи. Для верхней части теплообменника за среднюю разность температур принимают среднеарифметическую*:

$$\Delta t_{ср} = \frac{(303-291)+(220-206)}{2} = \frac{12+14}{2} = 13 \text{ град}$$

В нижней части теплообмен происходит при температуре и давлении воздуха, близких к критическим, при прибавлении к которым теплоемкость воздуха сильно меняется по длине теплообменника. Поэтому расчет поверхности ведут по среднеинтегральной разности температур, которую находят графическим путем**. Для нашего примера графическим построением получены следующие значения среднеинтегральной разности температур: азотная секция $\Delta t^{A}_{инт} = 13{,}3$ *град*; кислородная $\Delta t^{K}_{инт} = 11{,}96$ *град*.

По формулам теплопередачи между потоками газов подсчитывают общие коэффициенты теплопередачи [*ккал/(м²·ч·град)*]:

| | Азотная секция | Кислородная секция |
|---|---|---|
| Верхняя часть теплообменника . . . . . | 91,8 | 97,6 |
| Нижняя часть теплообменника . . . . . | 108 | 102,8 |

Тогда поверхности теплообменника равны:
нижняя часть, азотная секция

$$F^{н}_{A} = \frac{Q_A}{K_A \cdot \Delta t^{A}_{инт}} = \frac{22\,600}{108 \cdot 13{,}3} = 16 \text{ м}^2$$

нижняя часть, кислородная секция:

$$F^{н}_{K} = \frac{Q_K}{K_K \cdot \Delta t^{K}_{инт}} = \frac{4536}{102{,}8 \cdot 11{,}96} = 3{,}7 \text{ м}^2$$

верхняя часть, азотная секция:

$$F^{в}_{A} = \frac{Q_A}{K_A \cdot \Delta t_{ср}} = \frac{15\,500}{91{,}8 \cdot 13} = 13 \text{ м}^2$$

верхняя часть, кислородная секция:

$$F^{в}_{K} = \frac{Q_K}{K_K \cdot \Delta t_{ср}} = \frac{3440}{97{,}6 \cdot 13} = 2{,}7 \text{ м}^2$$

---

* Обычно в расчетах теплообменников принимают среднелогарифмическую разность температур по формуле

$$\Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2{,}3 \lg \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

для данного случая она близка к среднеарифметической, так как

$$\Delta t_{ср} = \frac{14-12}{2{,}3 \lg \frac{14}{12}} = \frac{2}{2{,}3 \cdot 0{,}0663} = 13{,}2 \text{ град}$$

** Подробнее о подсчете среднеинтегральной разности температур см. Справочник «Кислород», ч. 1, Изд. «Металлургия», 1967, стр. 127.



Приняв трубки размером 10 × 1 *мм*, задаются числом трубок в каждой секции и определяют их длину. Например, для нижней части принято 34 трубки. Пропорционально потокам воздуха число трубок ($n$) распределяется следующим образом:

кислородная секция

$$34 \cdot \frac{0{,}129}{0{,}73} = 6 \text{ шт.}$$

азотная секция

$$34 - 6 = 28 \text{ шт.}$$

Длина трубок нижней части азотной секции составит:

$$L = \frac{F}{\pi d n} = \frac{16}{3{,}14 \cdot 0{,}01 \cdot 28} = 18{,}2 \text{ м}$$

а с учетом 20%-ного запаса — 22 *м*. Аналогично определяют длины остальных трубок:

кислородная секция, нижняя часть 19,7 *м*; с 25%-ным запасом — 25 *м*;
азотная секция, верхняя часть 13,8 *м*; с 20%-ным запасом — 16,5 *м*;
кислородная секция, верхняя часть 11,7 *м*; с 20%-ным запасом — 14 *м*.

**Пример 17.** Составить материально-тепловой баланс и определить удельный расход энергии на 1 *м*³ кислорода в установке для получения газообразного кислорода, работающей по циклу низкого давления с регенераторами (схему и описание установки см. разд. 4.7.9).

Концентрация продуктов разделения: кислород 99,5%, азот 95%, кубовая жидкость 39% $O_2$, азотная флегма из карманов 95% $N_2$.

Приняты: холодопотери через изоляцию $q_и = 1{,}85$ *ккал/м*³ воздуха, в том числе: в регенераторах $q^{рег}_{и} = 0{,}6$ *ккал/м*³, колонне $q^{к}_{н} = 0{,}85$ *ккал/м*³, прочих аппаратах 0,4 *ккал/м*³.

Температура воздуха: перед турбокомпрессором $T_{сж} = 300$ °К, перед регенераторами $T_0 = 285$ °К.

Недорекуперация на теплом конце регенераторов: между воздухом и азотом $\Delta T^{т.к}_{N_2} = 4{,}2$ *град*, между воздухом и кислородом $\Delta T^{т.к}_{O_2} = 5$ *град*.

Разность температур на холодном конце регенераторов $\Delta T^{х.к}_{O_2 \text{ и } N_2} = 4$ *град*.

Температура петлевого воздуха после регенераторов $T_{петл} = 155$ °К.

Температурный напор в конденсаторе $\Delta T_{кон} = 2{,}5$ *град*.

Потери воздуха при переключении регенераторов $\Delta B = 5\%$.

Турбокомпрессором подается воздуха (при 20 °С и 760 *мм рт. ст.*) $B = 8900$ *м*³/*ч*.

Абсолютное давление воздуха после турбокомпрессора $p_{т.к} = 6{,}4$ *кгс/см*².

Материальный баланс. Количество получаемого кислорода:

$$K = B \cdot \frac{y_A - 79{,}1}{y_A - y_K} = 8900 \frac{95 - 79{,}1}{95 - 0{,}5} = 1500 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Тепловой баланс регенераторов (рис. 3.20) выражается следующим уравнением:

$$B\left(i^{6{,}27}_{285} - i^{6{,}07}_{100{,}5}\right) + B \cdot q^{рег}_{и} = K\left(i^{1{,}05}_{280} - i^{1{,}2}_{96{,}5}\right) + A\left(i^{1{,}07}_{280{,}8} - i^{1{,}3}_{96{,}5}\right) + B_п\left(i^{6{,}0}_{155} - i^{6{,}07}_{100{,}5}\right)$$

Из уравнения баланса определяется количество петлевого воздуха:

$$B_п = \frac{(3135 - 1782) + 0,6 \cdot 22,4 - 0,1694\,(3110 - 1828) - 0,8306\,(3112 - 1819)}{(2209 - 1782)} =$$

$$= 0,174 \text{ м}^3 \text{ на } 1 \text{ м}^3 \text{ воздуха}$$

(Значения энтальпий здесь даны в *ккал/кмоль* и берутся по соответствующим диаграммам).

Холодопотери в регенераторах уменьшаются при понижении температуры окружающего воздуха, что подтверждается опытом работы действующих установок. Анализ показывает, что это обусловлено влиянием капельной влаги, содержащейся в газах прямого и обратного потоков. Чем ниже температура поступающего воздуха, тем большее количество содержащейся в нем влаги находится в капельном состоянии и тем меньше разность между количеством капельной влаги в прямом и обратном потоках. Это уменьшает количество холода, выносимого с капельной влагой газами обратного потока, а следовательно, снижает холодопотери в регенераторах. Поэтому при более точных расчетах установок с регенераторами следует учитывать влияние на холодопотери капельной влаги*.

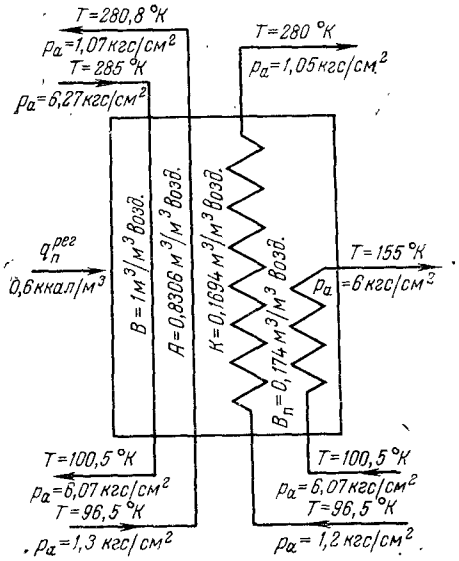



Рис. 3.20. Схема потоков в регенераторе (к примеру 17).

Общий тепловой баланс установки выражается следующим уравнением:

$$Q_{др} + Q_{дет} = Q_и + Q_{O_2}^{нед} + Q_{N_2}^{нед}$$

Определим холодопотери:

$$Q_и = 1,85 \text{ ккал/м}^3 \text{ воздуха } (7,7 \text{ кдж/м}^3)$$

$$Q_{O_2}^{нед} = K \cdot \Delta T_{O_2}^{т.к} \cdot C_p = 0,1694 \cdot 5 \cdot 0,312 = 0,2645 \text{ ккал/м}^3 \ (1,1 \text{ кдж/м}^3) \text{ воздуха}$$

где $C_p = 0,312$ *ккал/(м³·град)* — теплоемкость двухатомных газов при 1 *кгс/см²* и 300 °K.

$$Q_{N_2}^{нед} = A \cdot \Delta T_{N_2}^{т.к} \cdot C_p = 0,8306 \cdot 4,2 \cdot 0,312 = 1,088 \text{ ккал/м}^3$$

$$(4,5 \text{ кдж/м}^3) \text{ воздуха}$$

$$Q_{др} = B \cdot \Delta i_т = 1 \cdot 0,395 = 0,395 \text{ ккал/м}^3 \ (1,6 \text{ кдж/м}^3) \text{ воздуха}$$

---

* См. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения, Изд. «Машиностроение», т. 1, 1964, стр. 342.



где $\Delta i_т = 0,395$ *ккал/м³* — изотермический дроссель-эффект при $T = 285$ °K и $p_a = 6,27$ *кгс/см²*. Значение $\Delta i_т$ определяется по формуле Ноэлля [см. уравнение (2.11)]. Имеем для воздуха $a = 0,268$; $b = 0,00086$, тогда:

$$\alpha_i = (0,268 - 0,00086 \cdot 6,27)\left(\frac{273}{285}\right)^2 = 0,241$$

Интегральная разность температур $\Delta T = \alpha_i \cdot \Delta p$

$$\Delta p = 6,27 - 1 = 5,27 \text{ кгс/см}^2$$

следовательно

$$\Delta T = 0,241 \cdot 5,27 = 1,27 \text{ град}$$

тогда получим

$$\Delta i_т = \Delta T \cdot C_p = 1,27 \cdot 0,312 = 0,395 \text{ ккал/м}^3$$

$$Q_{дет} = Д \cdot \Delta i_д$$

где $Д$ — количество детандерного воздуха;

$\Delta i_д$ — действительный теплоперепад в детандере.

Подставим полученные значения в уравнение общего теплового баланса:

$$0,395 + \Delta i_д \cdot Д = 1,85 + 0,2645 + 1,088$$

или

$$\Delta i_д \cdot Д = 2,8075$$

Предварительными расчетами определено, что температура воздуха перед турбодетандером равна 131,7 °K.

Адиабатический теплоперепад в детандере:

$$\Delta i_д^{ад} = i_{131,7}^{6} - i_{ад}^{1,42} = 2035 - 1742,5 = 292,5 \text{ ккал/кмоль}$$

Действительный теплоперепад в детандере при адиабатическом к.п.д. $\eta_д = 0,75$ составит:

$$\Delta i_д = \Delta i_д^{ад} \cdot \eta_д = 292,5 \cdot 0,75 = 219 \text{ ккал/кмоль} =$$

$$= 9,77 \text{ ккал на } 1 \text{ м}^3 \text{ воздуха } (40,9 \text{ кдж/м}^3)$$

Состояние воздуха за турбодетандером по диаграмме $S - T$: температура 96,2 °K; энтальпия 1816 *ккал/кмоль*. Количество детандерного воздуха:

$$Д = \frac{2,8075}{\Delta i_д} = \frac{2,8075}{9,77} = 0,288 \text{ м}^3 \text{ на } 1 \text{ м}^3 \text{ воздуха}$$

Удельный расход энергии. На сжатие воздуха с абсолютного давления 1 до 6,4 *кгс/см²* при $T_{сж} = 300$ °K:

$$N_в = \frac{RT \cdot 2,3 \lg \frac{p_2}{p_1} \cdot \rho_н}{427 \cdot 860 \cdot \eta_{из.п}} \cdot \frac{B}{1 - \Delta B} =$$

$$= \frac{29,27 \cdot 300 \cdot 2,3 \lg \frac{6,4}{1,0} \cdot 1,293}{427 \cdot 860 \cdot 0,5} \cdot \frac{1}{0,95} = 0,1212 \text{ квт·ч/м}^3$$

Возврат энергии турбодетандером при механическом к.п.д. турбодетандера и редуктора $\eta_м = 0,75$:

$$N_{т.д} = \frac{Д \cdot \Delta i_д \cdot \eta_м}{860} = \frac{0,288 \cdot 9,77 \cdot 0,75}{860} = 0,00245 \ квт \cdot ч/м^3$$

Расход энергии на 1 $м^3$ кислорода

$$N_{O_2} = \frac{N_в - N_{т.д}}{K} = \frac{0,1212 - 0,00245}{0,1694} = 0,702 \ квт \cdot ч/м^3$$

$$(2520 \ кдж/м^3)$$

При расчете тепловых балансов воздухоразделительных установок и определении холодопотерь от недорекуперации можно принимать следующие разности температур на теплом конце теплообменных аппаратов:

| Тип установки | Аппарат | Разность температур, *град* |
|---|---|---|
| Высокого давления | | |
| с дросселированием | Основной теплообменник | 3—5 |
| с аммиачным охлаждением | Теплообменники | |
| | предварительный | 5—10 |
| | основной | 3—5 |
| с поршневым детандером при температуре воздуха на входе в детандер 30 °С | Основной теплообменник | 12—14 |
| то же от 3 до —30 °С | Предварительный теплообменник | 2—5 |
| Среднего давления с поршневым детандером | | |
| при температуре воздуха на входе в детандер от —30 до —40 °С | Предварительный теплообменник | 8—12 |
| при температуре воздуха на выходе из детандера близкой к температуре насыщения | Основной теплообменник | 5—8 |
| Двух давлений | | |
| с регенераторами и аммиачным охлаждением | Регенераторы | 3—5 |
| | Теплообменники | |
| | предварительный | 5—10 |
| | основной | 3—5 |
| с теплообменниками и аммиачным охлаждением | Теплообменники воздуха низкого давления | |
| | предварительный | 10—15 |
| | основной | 10—12 |
| | Теплообменники воздуха высокого давления | |
| | предварительный | 5—10 |
| | основной | 3—5 |
| с регенераторами и поршневым детандером | Регенераторы | 3—5 |
| | Основной теплообменник воздуха высокого давления | 12—15 |
| Низкого давления | Регенераторы | 3—5 |
| | Змеевики для вывода чистых продуктов в регенераторах с насыпной насадкой | 4—8 |
| | Теплообменники обратного ввода петлевого воздуха | 8—12 |



## 3.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ТАРЕЛОК

Верхняя часть ректификационной колонны, расположенная выше уровня ввода разделяемой смеси, называется *концентрационной секцией*. В ней повышается концентрация низкокипящего компонента смеси (дистиллята), которым при разделении воздуха

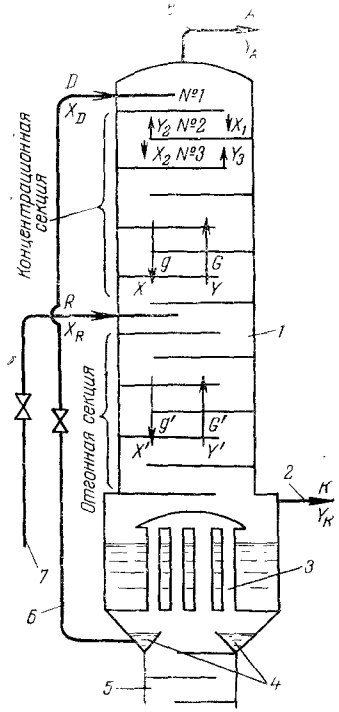



Рис. 3.21. Схема материальных потоков в верхней колонне:

*1* — верхняя колонна; *2* — отвод кислорода; *3* — конденсатор; *4* — карманы конденсатора; *5* — нижняя колонна; *6* — подача азота из карманов; *7* — подача кубовой жидкости; *8* — отвод газообразного азота.

Обозначения потоков: $D$ в $м^3/ч$ или *кмоль/ч* — количество жидкого азота, подаваемого из карманов конденсатора; $A$ — количество газообразного азота, отбираемого из колонны; $G$ и $G'$ — количества паров, поднимающихся по колонне; $g$ и $g'$ — количества стекающей по колонне жидкости (флегмы); $R$ — количество кубовой жидкости; $K$ — количество газообразного кислорода, отбираемого из колонны.

Обозначения концентраций (в %): $x$ и $x'$ — содержание низкокипящего компонента (азота) в жидкости (флегме); $y$ и $y'$ — содержание азота в парах; $x_D$ — содержание азота в жидкости из карманов; $y_A$ — содержание азота в газообразном азоте; $x_R$ — содержание азота в кубовой жидкости; $y_K$ — содержание азота в отбираемом газообразном кислороде; $x_1$, $x_2$ и т. д. — содержание азота в жидкости на тарелках № 1, № 2 и т. д.; $y_2$, $y_3$ и т. д. — содержание азота в паре над тарелками № 2, № 3 и т. д.

является азот. Нижняя часть колонны, расположенная ниже уровня ввода смеси, называется *отгонной секцией*. В ней происходит отгонка низкокипящего компонента (азота) и вследствие этого — повышение концентрации высококипящего компонента — кислорода.

Число теоретических тарелок определяют обычно графическими методами. Достаточно простым является метод Мак-Кэба и Тиле, применение которого будет показано ниже, на примере.

На рис. 3.21 дана схема материальных потоков в верхней колонне. Для произвольного сечения концентрационной секции верхней колонны можно написать следующие уравнения материального баланса:

по материальным потокам

$$G + D = A + g \qquad (3.11)$$

по азоту

$$Gy + Dx_D = Ax_D + gx \qquad (3.12)$$

Из уравнения (3.12) получаем:

$$y = \frac{g}{G}\cdot x + \frac{(A-D)}{D}\cdot x_D \qquad (3.13)$$

Величина $A$ больше величины $G$, так как при дросселировании жидкого азота, подаваемого из карманов конденсатора, он частично испаряется.

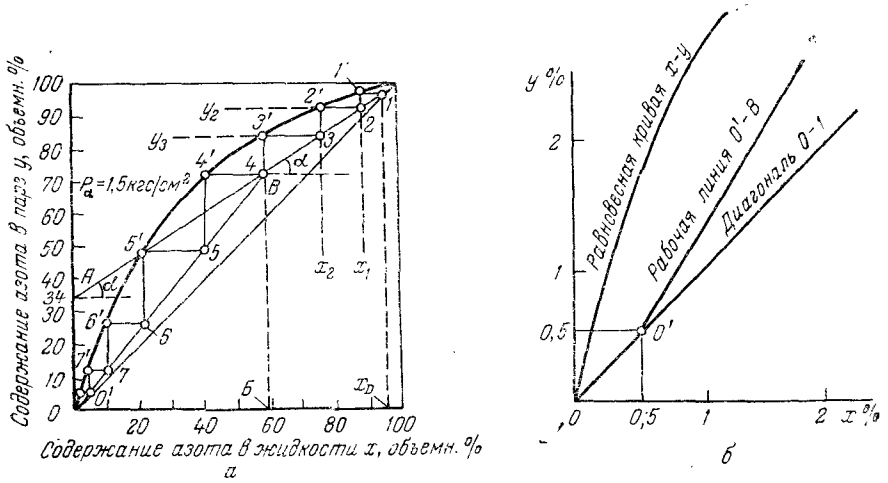



Рис. 3.22. Графическое определение числа теоретических тарелок в верхней колонне:

*а* — общий график; *б* — нижняя часть графика в увеличенном масштабе.

В уравнении (3.13) переменными величинами по высоте колонны являются только концентрации $x$ и $y$; поэтому на графике в прямоугольной системе координат данное уравнение выражается прямой линией, тангенс угла наклона которой к оси $x$: $\operatorname{tg}\alpha = g/G$. Величина $g/G$ называется *флегмовым отношением**. С увеличением флегмового отношения условия процесса ректификации улучшаются.

Выполним построение графика для определения числа теоретических тарелок верхней колонны (рис. 3.22). По горизонтальной оси откладываем содержание азота в жидкости $x$ (объемн. %), а по вертикальной — содержание азота в паре $y$ (объемн. %). Эти величины берутся для абсолютного давления 1,5 *кгс/см²*. Пользуемся для этого номограммой рис. 3.3 (в Приложении). Строим кривую $x - y$ равновесного состояния жидкости и пара азото-кислородной смеси для 1,5 *кгс/см²* и проводим диагональ между начальной и конечной точками этой кривой, для которых $x = y = 0$ и $x = y = 100\%$. В соответствии с условиями предыдущих примеров принимаем концентрацию отходящего азота $y_A = 96\%$ и допускаем, что составы жидкости и пара на верхней тарелке одинаковы; следовательно, $x_D = y_A = 96\%$. Восстановив на горизонтальной оси в точке $x = x_D = 96\%$ перпендикуляр, получим в пересечении его с диагональю точку *1*. Из уравнений (3.11) и (3.13) следует, что при $x = x_D$ величина $y = y_D$. Это означает, что точка *1* лежит также на прямой, выражаемой уравнением (3.13). Для $x = 0$ из уравнения (3.13) получим значение $y_0$:

$$y_0 = \frac{(A-D)}{G}\cdot x_D \qquad (3.14)$$

Из материального баланса в примерах 6 и 7 имеем: количество отходящего азота $A = 584$ *кг/ч*, или 467 *м³/ч*; количество азота из карманов конденсатора $A_ж = D = 402$ *кг/ч*, или 320 *м³/ч*. При дросселировании с абсолютного давления 6 до 1,5 *кгс/см²* испаряется 18%, или ≈ 72 *кг/ч* азота. Следовательно, в верхнюю колонну фактически поступает флегмы не $D = 402$ *кг/ч*, а меньше: $g = (1-0{,}18)D = 0{,}82\cdot 402 = 330$ *кг/ч*, или 264 *м³/ч*.

Азот, испаряющийся при дросселировании (72 *кг/ч*, или 56 *м³/ч*) [illegible] ет в процессе ректификации в верхней колонне и является [illegible] не участвуета $A$. Следовательно, $G = A - 56 = 467$ [illegible] ся частью отходящего азочину в уравнение (3.14), находим [illegible] $- 56 = 411$ *м³/ч*. Подставив эту вели- [illegible] ко при $x = 0$

[illegible] кгс/см²

$$y_0 = \frac{467-320}{411}\cdot 96 \approx 34\%$$

[illegible]

Отложив это значение $y_0$ на вертикальной оси графика (точка $A$), проводим [illegible]мую $A - 1$, называемую *рабочей линией*, для которой действительно уравнение (3.13). Для линии $A - 1$ величина $\operatorname{tg}\alpha = \frac{g=254}{G=411} = 0{,}642$. Ту же величину находим и из графика рис. 3.22,*а*:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{x_D - y_0}{x_D} = \frac{96-34}{96} = 0{,}642$$

Содержание азота в кубовой жидкости, подаваемой в верхнюю колонну, равно $x_R = 58\%$ $N_2$ (см. пример 7). Восстановим из этой точки (*Б*) на оси $x$ перпендикуляр до пересечения с прямой $A - 1$ в точке $B$. Линия $B - 0'$ является рабочей линией для отгонной секции верхней колонны. Точка $0'$ лежит на диагонали и соответствует содержанию азота в газообразном кислороде, отводимом из конденсатора, $y_K = 0{,}5\%$. Это построение повторено в увеличенном масштабе на рис. 3.22,*б*.

Составим материальный баланс для произвольного сечения отгонной секции верхней колонны:

по материальным потокам

$$g' = G' + K \qquad (3.15)$$

по азоту

$$g'\cdot x' = G'\cdot y' + K\cdot y_K \qquad (3.16)$$

Соответствующие обозначения величин даны на рис. 3.21. Из уравнения (3.16) получим:

$$y' = \frac{g'}{G'}\cdot x' - \frac{K}{G'}\cdot y_K \qquad (3.17)$$

* В отличие от этого отношение $v = g/A$ для верхней колонны или $v = g/D$ для нижней колонны называется *флегмовым числом*.

Выражение (3.17) является уравнением рабочей линии отгонной секции верхней колонны и соответствует прямой $0'—B$.

Для определения числа теоретических тарелок, необходимых для осуществления ректификации в заданных пределах концентраций, проводим из точки *1* (см. рис. 3.22, *а*) горизонталь до пересечения с равновесной кривой в точке *1'*, из которой опускаем перпендикуляр до пересечения с рабочей линией в точке *2*. Через эту точку вновь ведем горизонталь до пересечения с равновесной кривой в точке *2'* и т. д., производя ступенчатое построение сверху вниз. В соответствии со смыслом уравнения (3.13) рабочей линии точка *2* отвечает составу жидкости $x_1$, стекающей с тарелки № 1 (см. рис. 3.21), и составу пара $y_2$, поднимающегося с тарелки № 2; точно так же точка *3* отвечает составу жидкости $x_2$, стекающей с тарелки № 2, и составу пара $y_3$, поднимающегося с тарелки № 3, и т. д. Отрезок *1—1'* показывает изменение концентрации азота в жидкости на тарелке № 1, а отрезок *1'—2* — изменение концентрации азота в паре, проходящем через слой жидкости на той же тарелке; отрезок *2—2'* — изменение концентрации азота в жидкости на тарелке № 2, а отрезок *2'—3* — изменение концентрации азота в паре, проходящем через слой жидкости на той же тарелке, и т. д. Количество горизонтальных ступеней на графике дает число теоретических тарелок концентрационной секции верхней колонны, необходимое для получения (в месте ввода кубовой жидкости из испарителя) флегмы с концентрацией азота $x_R = 58\%$, что соответствует на графике точке *B*. Аналогичное построение производят и для отгонной секции верхней колонны, пользуясь для этого равновесной кривой и нижней рабочей линией $0'—B$.

Из графика (рис. 3.22,*а*) имеем для концентрационной секции 3, а для отгонной — 5 теоретических тарелок. Принимаем, учитывая влияние аргона, к.п.д. тарелок для концентрационной секции 0,3 и для отгонной 0,2. Тогда получим число фактических тарелок в концентрационной секции $\frac{3}{0,3} = 10$ и в отгонной секции $\frac{5}{0,2} = 25$, а всего тарелок в колонне $10 + 25 = 35$.

Подобным же способом определяют число теоретических тарелок в нижней колонне. Для этого строим равновесную кривую (рис. 3.23) в координатах $x—y$ для абсолютного давления нижней колонны 6 *кгс/см*².

Обозначив потоки паров и флегмы для нижней колонны соответственно $G_н$ и $g_н$, составим материальный баланс концентрационной секции нижней колонны:

по материальным потокам

$$G_н = g_н + D \tag{3.18}$$

по азоту

$$G_н y = g_н \cdot x + D x_D \tag{3.19}$$



Подставив в уравнение (3.19) значения $G_н$ из уравнения (3.18), получим $g_н y + Dy = g_н x + Dx_D$, откуда имеем уравнение рабочей линии для концентрационной секции нижней колонны:

$$y = \frac{g_н}{g_н + D} \cdot x + \frac{D x_D}{g_н + D} \tag{3.20}$$

При $x = 0$

$$y_0 = \frac{D x_D}{g_н + D} \tag{3.21}$$

Тангенс рабочей линии $\operatorname{tg} \alpha = \frac{g_н}{g_н + D}$.

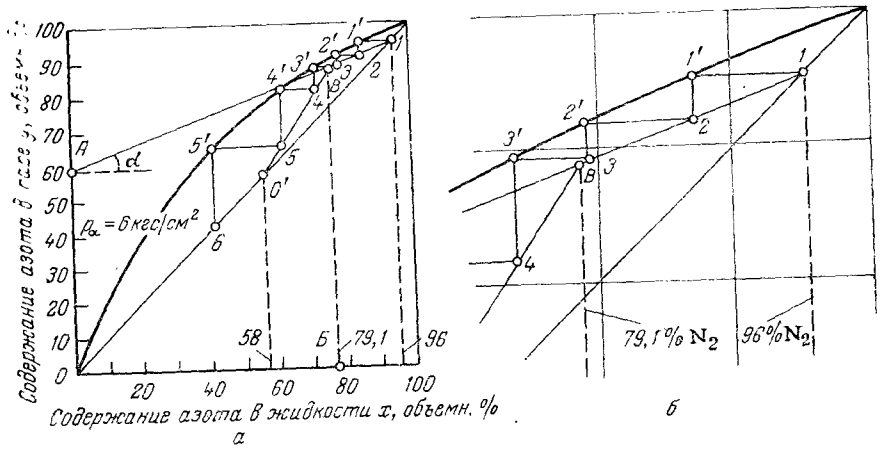



Рис. 3.23. Графическое определение числа теоретических тарелок в нижней колонне:

*а* — общий график; *б* — верхняя правая часть графика в увеличенном масштабе

Составим далее материальный баланс для отгонной секции нижней колонны:

по материальным потокам

$$g'_н = G'_н - R \tag{3.22}$$

по азоту

$$g_н \cdot x'_н = G'_н \cdot y'_н + R \cdot x_R \tag{3.23}$$

Из выражения (3.23) получим уравнение рабочей линии для отгонной секции нижней колонны:

$$y'_н = \frac{g'_н}{G'_н} \cdot x'_н - \frac{R}{G'_н} \cdot x_R \tag{3.24}$$

Точка O′ лежит на диагонали *0—1* и соответствует значению $x_R$ (см. рис. 3.23). По условиям примеров 7 и 11: $D = 320$ *м³/ч*, $x_D = 96\%$; $g_н = 248/1{,}29 = 192$ *м³/ч*; $x_R = 58\%$. Для графического определения числа теоретических тарелок в концентрационной секции нижней колонны строим рабочую линию. Подставив указанные выше величины в уравнение (3.21), получим $y_0 = 320 \cdot 96/(192 + 320) = 60\%$. Проводим линию *1 — A* и вторую рабочую линию *0′ — B* для отгонной секции. Точка *B* соответствует $x_{возд} = 79{,}1\%$ $N_2$, а точка *O′* соответствует $x_D = 58\%$ $N_2$. Производя ступенчатое построение (на рис. 3.23, *б*, верхняя правая часть графика показана в увеличенном масштабе), получаем число теоретических тарелок: в концентрационной секции — 3 шт. и в отгонной — 2 шт. Принимая к.п.д. для тарелок концентрационной секции 0,3 и для отгонной 0,35, получим фактическое число тарелок:

$$\frac{3}{0{,}3} + \frac{2}{0{,}35} = 16$$

В нижних колоннах, в которых змеевик отсутствует и воздух подается в состоянии сухого насыщенного пара в пространство над кубовой жидкостью, имеется только концентрационная секция, а отгонная отсутствует.

Приведем пример построения графика расчета числа теоретических тарелок для нижней колонны с вводом воздуха в куб (к примеру 16, рис. 3.18). По номограмме *T — p — i — x — y* определяем для абсолютного давления в нижней колонне 6 *кгс/см²* температуру конденсации воздуха $T^6_{кон} = 100{,}5\,°K$. В этих условиях кубовая жидкость имеет состав: 38% $O_2$ и 62% $N_2$.

Составляем материальный баланс нижней колонны для условий примера 16:

$$K + A = B = 720 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$y_K K + y_A A = 0{,}791 \cdot B$$

Решая совместно оба уравнения, получим:

$$K = B \cdot \frac{y_A - 0{,}791}{y_A - y_K} = 720 \cdot \frac{0{,}95 - 0{,}791}{0{,}95 - 0{,}62} = 348 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Откуда

$$A = B - K = 720 - 348 = 372 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Нижняя колонна имеет одну рабочую линию (так как отгонная часть отсутствует)

$$y_0 = \frac{D \cdot x_D}{g_н + D}$$

В данном случае $D = A = 372$ *м³/ч*; $x_D = y_A = 95\%$ $N_2$. Для этого случая $g_н = K$, следовательно $g_н + D = K + A = B$

Таким образом

$$y_0 = \frac{D \cdot x_D}{B} = \frac{372 \cdot 95}{720} = 49{,}1\%$$

Производя построение (рис. 3.24) получим число теоретических тарелок 5 шт. Если к.п.д. тарелки 0,3, то число фактических тарелок нижней колонны 5 : 0,3 = 17 шт.

Из рассмотрения описанного графического метода нахождения числа теоретических тарелок можно сделать некоторые выводы



о влиянии величины флегмового отношения и флегмового числа на условия ректификации в колонне.

При уменьшении флегмового отношения $\operatorname{tg}\alpha = \frac{g}{G}$ уменьшается угол $\alpha$ и точка *A* рабочей линии *A—1* (см. рис. 3.22, *а*) расположится выше. Точка *B* также переместится вверх, пока не совпадет с равновесной кривой *x—y*. Это соответствует наименьшему значению флегмового отношения *g/G*, при котором разность концентраций жидкости и пара равна нулю. Для того чтобы в этих условиях получить на уровне питания концентрацию азота в жидкости, соответствующую точке *Б*, число теоретических тарелок в концентрационной секции верхней колонны должно быть бесконечно большим.

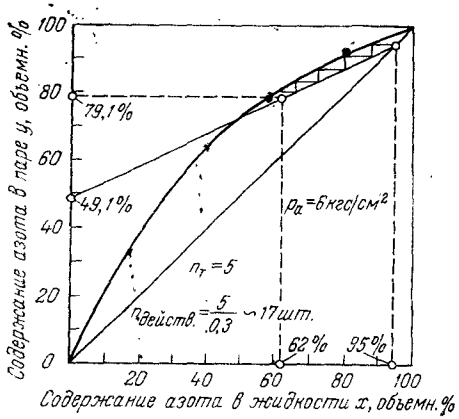



Рис. 3.24. Графическое определение числа теоретических тарелок для нижней колонны с вводом воздуха непосредственно в куб.

При увеличении флегмового отношения $\operatorname{tg}\alpha = g/G$ угол $\alpha$ увеличивается и точка *B* рабочей линии *A—1* опускается до совпадения с диагональю ($\operatorname{tg}\alpha = \frac{g}{G} = 1$; $\alpha = 45°$). Это соответствует наиболее благоприятным условиям ректификации, для которых требуется минимальное число теоретических тарелок. В этом случае все количество паров, поднимающихся по колонне, полностью конденсируется, т. е. $G = g$; следовательно, количество отводимого продукта *A* (или *D* — для концентрационной секции нижней колонны) равно 0. Тогда флегмовое число $v = g/A$ (или $v = g/D$ для концентрационной секции нижней колонны) равно бесконечности.

Описанный метод определения числа тарелок по Мак-Кэбу и Тиле прост и нагляден, но не дает точных результатов, так как не учитывает изменения отношения количества флегмы и пара в колонне, изменения количества передаваемой теплоты при испарении и конденсации компонентов, а также влияния аргона. Поэтому разработаны более точные (но более сложные) графические методы расчета, учитывающие действительные условия протекания процесса разделения воздуха в колонне. Пользуясь этими методами производят расчеты при конструировании воздухоразделительных аппаратов.

ГЛАВА 4

# УСТАНОВКИ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

## 4.1. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

В зависимости от количества расходуемого кислорода всех потребителей можно разделить на три группы: мелкие, средние и крупные.

К мелким потребителям относят предприятия, расходующие до 30 $м^3/ч$, к средним — от 30 до 150 $м^3/ч$, к крупным — более 150 $м^3/ч$. На долю крупных потребителей приходится 75—80% производимого в стране кислорода.

Мелкие и средние потребители применяют технический кислород, в основном для резки и сварки металлов; крупные — технический и технологический кислород (а также азот) для процессов основного производства (металлургических, химических и др.).

Мелких и средних потребителей продуктами разделения воздуха снабжают районные кислородные заводы; часть этих потребителей имеет собственные кислородно-азотные установки. Некоторым потребителям кислород доставляется в жидком виде и затем газифицируется.

Для удовлетворения потребности крупных потребителей (металлургических, химических и других предприятий) в кислороде, азоте, аргоне, криптоне и ксеноне создается цех разделения воздуха (кислородный цех, кислородная станция), оснащенный мощными воздухоразделительными установками. Частично продукты разделения воздуха этих предприятий используются также для обеспечения более мелких потребителей.

При значительной потребности предприятий данного района в продуктах разделения воздуха создаются районные кислородные заводы.

Для процессов, связанных с применением очень низких температур (хранения и транспортировки биологических и скоропортящихся продуктов и т. п.), широко используется жидкий азот, получаемый на собственных установках потребителей или доставляемый в танках с районных заводов, имеющих крупные установки для получения сжиженного азота.

Редкие газы — аргон, криптон, ксенон, неоно-гелиевую смесь получают на крупных воздухоразделительных установках попутно



с получением кислорода и азота. Эти газы доставляются потребителям обычно в баллонах после очистки от примесей — кислорода и азота. При относительно небольшом количестве этих газов затраты на их транспортирование к потребителю невелики. Некоторым крупным потребителям аргон доставляется в жидком виде.

Себестоимость газообразного кислорода зависит от мощности установки и характеризуется следующими показателями (по данным Гипрокислорода):

| Тип установки | КГН-30 | КГСН-150 | К-0,4 | БР-14 | БР-5М | БР-1 | БР-2М |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Затраты на 1 $м^3$ кислорода, % | | | | | | | |
| электроэнергия | 22 | 38 | 40 | 35 | 55 | 58 | 54,0 |
| зарплата | 32 | 15 | 12 | 17 | 3 | 3 | 2,0 |
| материалы | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,5 |
| амортизация | 13 | 17 | 18 | 18 | 16 | 14 | 18,5 |
| цеховые расходы | 20 | 16 | 19 | 19 | 15 | 14 | 15,0 |
| общезаводские расходы | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10, |

Как видно из этих данных, для крупных установок (например, БР-5М, БР-1, БР-2М) основными являются энергетические затраты, для более мелких — зарплата и энергозатраты. При расходе кислорода до 150 $м^3/ч$ и расстоянии до 400 *км* газообразные продукты в большинстве случаев выгоднее доставлять под давлением 150—200 $кгс/см^2$ в реципиентах (емкостью 375, 750 и 1500 $м^3$ газа), смонтированных на автоприцепах. При расстоянии менее 50 *км* их выгоднее перевозить автомашинами в баллонах, установленных в контейнеры. При расстоянии более 50 *км* баллоны выгоднее транспортировать по железной дороге.

Транспортировка газообразных продуктов разделения воздуха по трубопроводам экономически целесообразна только при относительно больших количествах потребляемого газа и сравнительно небольших расстояниях, так как на их сооружение требуются большие капитальные затраты.

Если расход кислорода превышает 400 $м^3/ч$ и расстояние до потребителя меньше 50 *км*, наиболее выгодно подавать его по трубопроводу от крупных установок разделения воздуха. Расчеты показывают, что при потреблении 1400 $м^3/ч$ рентабельна подача кислорода по трубопроводу от установок БР-1Кч даже на расстояние до 100 *км*.

Технико-экономические расчеты показывают, что при потреблении до 20 $м^3/ч$ технического кислорода и расстоянии до 200 *км* наиболее экономичен способ доставки его в жидком виде в автомобильных газификационных установках, а при бо́льших расстояниях — в автотанках с газификацией на месте в безнасосных газификаторах. Если размер потребления и расстояние превышают указанные, выгоднее установки разделения воздуха строить на местах потребления кислорода или азота.

Приведенные данные показывают, что выбор наиболее экономичного способа организации снабжения потребителей продуктами разделения воздуха зависит от многих факторов (размеров и режима потребления газа, расстояния, типа установки, требований к продукту и пр.). Существенное влияние могут оказывать и местные условия района: обеспеченность энергией и водой, состояние и разветвленность дорог и т. п. Поэтому при проектировании заводов и станций в каждом отдельном случае выбирают тот вариант, который позволяет потребителю получать кислород или азот с наименьшими затратами.

Возможны следующие три варианта хозяйственной организации цеха разделения воздуха:

1) в виде самостоятельного предприятия, расположенного на отдельной площадке; 2) в составе вспомогательных цехов на предприятиях металлургической, химической, машиностроительной и других отраслей промышленности; 3) в виде независимого предприятия, расположенного на территории, примыкающей к крупному потребителю основного продукта разделения воздуха.

Выбор того или иного варианта производится проектирующей организацией и заказчиком.

В крупном цехе разделения воздуха обычно имеется несколько отделений (в зависимости от типа установок):

1) машинное — с воздушными и кислородными компрессорами;

2) аппаратное — с воздухоразделительными аппаратами и детандерами;

3) аммиачное — с аммиачно-холодильными установками (размещается в отдельном помещении);

4) щелочное — с установками для очистки воздуха от двуокиси углерода, аппаратурой для приготовления раствора щелочи и щелочными насосами;

5) газгольдерное (или отдельный газгольдер, расположенный вне здания кислородного цеха);

6) насосное — с градирней или брызгальным бассейном для охлаждения оборотной воды, подаваемой в холодильники компрессоров;

7) наполнительное — с устройствами для наполнения баллонов сжатым кислородом;

8) склады для наполненных и порожних баллонов с мастерской для их ремонта и испытания;

9) реципиентное;

10) очистки редких газов.

В ряде случаев предусматривают помещения для ремонтно-механической мастерской, цехового склада, лаборатории, конторы. Для установок без аммиачного цикла, а также с очисткой воздуха цеолитами и снабженных жидкостными кислородными насосами отделения, указанные в п. 3, 4 и 5, не нужны.

Если в воздухоразделительном цехе вырабатываются жидкие кислород или азот, то должны быть установлены цистерны для



хранения жидких кислорода или азота и заполнения ими транспортных автомобильных и железнодорожных емкостей.

В зависимости от размера цеха и производительности воздухоразделительных агрегатов отделения могут быть расположены в одном помещении или в разных помещениях и зданиях.

Проектирование и строительство воздухоразделительных цехов, а также их размещение на территории предприятия регламентируется строительными нормами и правилами и специальными «Указаниями», учитывающими особенности цехов разделения воздуха*.

Весь комплекс цехов и вспомогательных служб производства продуктов разделения воздуха следует размещать в одном или минимальном количестве зданий. Допускается блокирование этих объектов в общем здании с другими производствами, кроме тех, в которых может быть открытый огонь (литейные, термические, кузницы и т. п.), получают ацетилен, углеводороды ацетиленового ряда, карбид кальция и водород**.

При блокировании цехов разделения воздуха с производствами, которые выделяют в атмосферу вредные газы в количествах, превышающих установленные для воздухоразделительных цехов нормы, обязательно устройство воздухозабора из незагрязненной зоны в одной или нескольких точках в зависимости от направления господствующих ветров. Устройство местных воздухозаборов в данном случае не допускается. Воздухозаборные шахты следует располагать в незагрязненной зоне на расстоянии, превышающем пределы установленных для данных производств разрывов от воздухоразделительного цеха. Не допускается устройство каких-либо производств над или под помещениями кислородной станции. В случае необходимости помещения различных цехов могут быть изолированы друг от друга противопожарными стенами.

Поскольку получение продуктов разделения атмосферного воздуха имеет свои особенности, присущие только данной отрасли производства, оно не отнесено ни к одной из пяти категорий по пожарной опасности, предусмотренных положениями СНиП II-М.2—62***. Здания цехов разделения воздуха должны соответствовать требованиям для сооружений II и III степени огнестойкости в зависимости от степени пожарной опасности. Например, для машинного, аппаратного, газгольдерного для кислорода, наполнительного отделений и складов баллонов принимают II степень, а для отделений щелочного, газгольдерного, азота и аргона — III степень огнестойкости.

Емкость пристроенного (сблокированного с другими производствами) склада баллонов не должна превышать 4000 наполненных

* «Указания по проектированию производства кислорода и других продуктов разделения воздуха, У 866-00-4», разработанные Гипрокислородом, 1970.

** Это не относится к цехам по производству азота, очистки редких газов с применением водорода и криогенным станциям, которые разрешается блокировать с производством электролизного водорода мощностью не более 100 $м^3/ч$.

*** «Строительные нормы и правила (СНиП)» Госстроя СССР.

баллонов; в том числе не более 500 баллонов, наполненных горючими газами и хранимых в отсеках склада, изолированном от других помещений противопожарными стенами.

Максимальная емкость складов при отделениях (цехах) наполнения не должна превышать 10 000 баллонов. Склады строят секциями, каждая на 1000 наполненных баллонов с кислородом и негорючими газами. В стенах, разделяющих секции, допускается устройство проемов для средств механизации транспортировки баллонов и для прохода персонала.

Хранилища для жидких кислорода и азота, пристраиваемые к основному зданию, должны иметь емкость не более 1000 *т*. Гидравлическая емкость пристраиваемых хранилищ (реципиентов) для сжатого воздуха, кислорода, азота при давлении 64 *кгс/см*$^2$ и выше не должна превышать значения $6000/P_{max}$ (где $P_{max}$ — максимальное абсолютное рабочее давление в реципиентах). При блокировании реципиентов с отделениями (цехами) хранения баллонов гидравлическая емкость реципиента должна быть не более $(24\,000-6n) : P_{max}$ (где $n$ — число баллонов, хранимых в отделении или цехе). Емкость реципиентов с давлением ниже 64 *кгс/см*$^2$, блокируемых с другими производственными помещениями, не регламентируется. Все реципиенты, располагаемые вне помещений, должны быть защищены ограждениями, препятствующими подходу лиц, не связанных с обслуживанием.

Для технического прогресса в настоящее время характерно повышение установленной мощности технологического и энергетического оборудования. Это снижает удельные капитальные затраты, сокращает сроки строительства и ввода в действие, уменьшает себестоимость и повышает производительность труда при выработке продукции. Это полностью относится и к цехам для производства кислорода, азота, инертных и редких газов. Отечественный и зарубежный опыт показывает, что, как правило, выгоднее устанавливать одну — две крупные воздухоразделительные установки, чем несколько более мелких. При крупных воздухоразделительных агрегатах необходимый резерв для потребителей обеспечивается накапливанием жидкого кислорода в стационарных хранилищах.

На рис. 4.1 показан общий вид воздухоразделительного цеха химического комбината, оборудованного крупным блоком разделения воздуха типа БР-9. Воздушный компрессор и щиты управления, контрольно-измерительных приборов и автоматики расположены на площадке второго этажа с отметкой 5,4 *м*. На этой же площадке установлены два турбодетандерных агрегата типа ТДР-19-4, один из которых является резервным и используется при пуске блока разделения. Основная арматура имеет электрические приводы с дистанционным управлением*.

* Н. П. Краскина, М. Я. Шапиро, В. А. Шмелев. Испытание опытно-промышленного образца блока разделения воздуха типа БР-9. Кислородная промышленность, № 2, Гипрокислород, 1965.



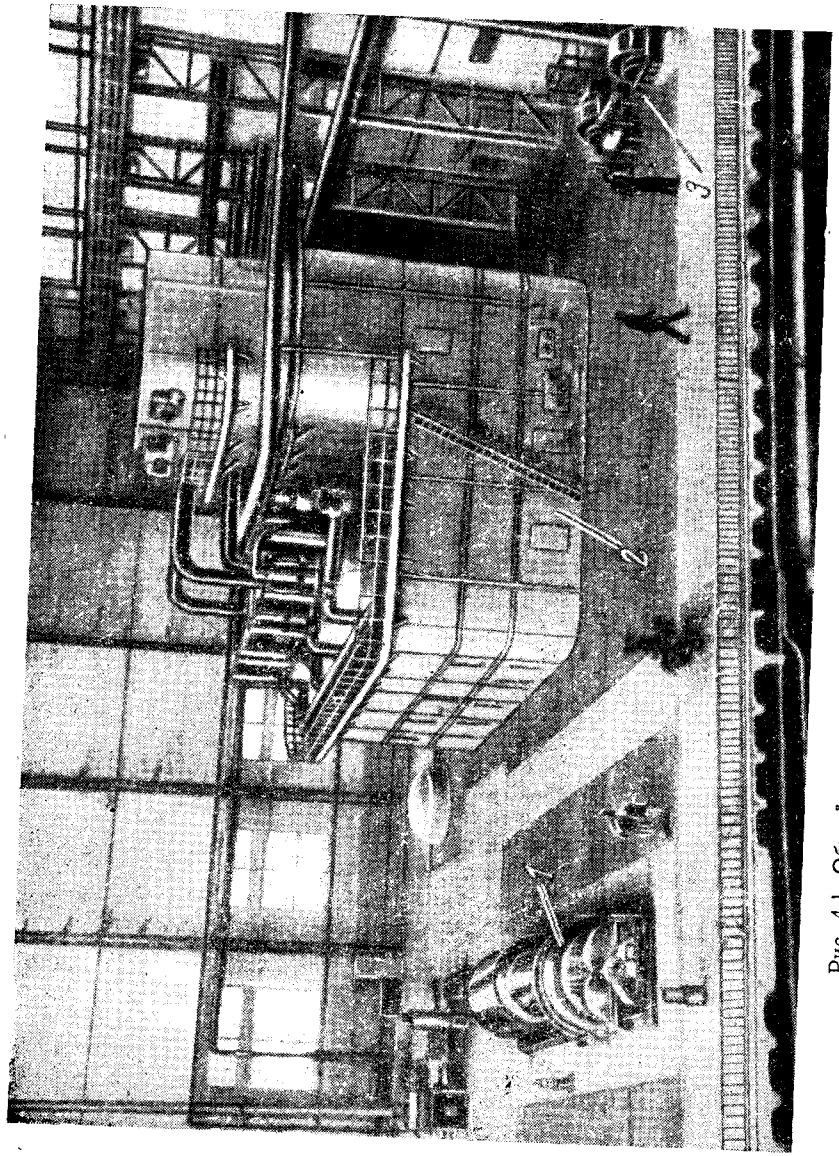



Рис. 4.1. Общий вид цеха с блоком разделения воздуха БР-9:
*1* — воздушный компрессор; *2* — блок разделения воздуха; *3* — турбодетандеры.

Получаемые в кислородных цехах продукты разделения воздуха — кислород, азот, аргон и др. доставляются потребителям в газообразном или жидком виде.

Доставка сжатых газов осуществляется или по трубопроводам, или в 40-литровых баллонах по железной дороге и автотранспортом в специальных контейнерах (по 8—10 баллонов), или в автореципиентах под давлением 150—200 *кгс/см²*. Транспортировка сжиженных газов производится в автотанках с газификацией на

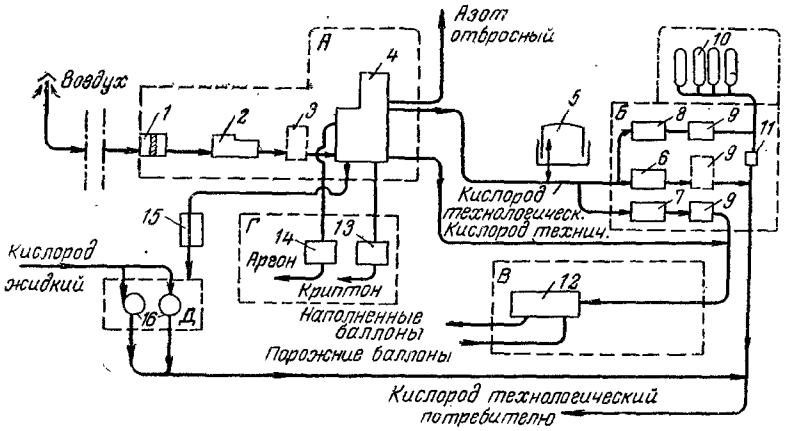



Рис. 4.2. Примерная схема организации технологического процесса разделения воздуха в кислородном цехе металлургического завода:

*А* — основной (кислородный) цех; *Б* — цех компрессии; *В* — цех наполнения баллонов; *Г* — цех очистки инертных газов; *Д* — отделение газификации жидкого кислорода; *1* — камера воздушных фильтров; *2* — воздушный турбокомпрессор; *3* — оборудование для очистки воздуха от $CO_2$ и осушки от влаги; *4* — блок разделения воздуха; *5* — кислородный газгольдер; *6, 7* и *8* — кислородные компрессоры; *9* — блоки осушки кислорода; *10* — реципиенты высокого давления для кислорода; *11* — кислородные редукторы и регуляторы давления кислорода, поступающего к потребителю; *12* — наполнительные рампы; *13* — оборудование для очистки и обогащения криптоноксенонового концентрата, *14* — установка для очистки аргона от кислорода; *15* — стационарная емкость для жидкого кислорода; *16* — газификаторы для жидкого кислорода. Оборудование поз. *3* и *9*, показанное пунктиром, устанавливают по мере надобности, если оно предусмотрено проектом цеха.

месте потребления насосным или безнасосным стационарным газификатором либо автомобильной газификационной установкой (АГУ), а также в автотанках с насосами для перекачивания жидкости.

Примерная схема технологического процесса в цехе разделения воздуха на металлургическом заводе, где используется технологический кислород для интенсификации выплавки чугуна и стали, приведена на рис. 4.2. Поскольку такой цех оснащается крупными воздухоразделительными установками, экономически целесообразно организовать, попутно с производством технологического



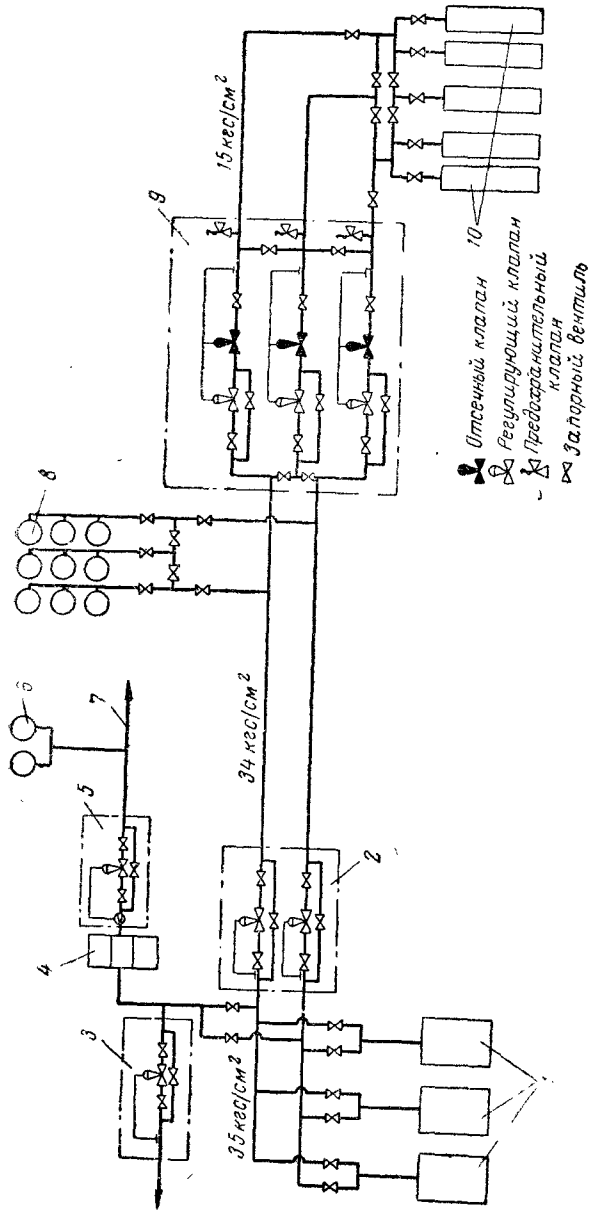



Рис. 4.3. Схема снабжения кислородом конверторных цехов:

*1* — кислородные компрессоры; *2* — узел регулирования давления нагнетания; *3* — узел регулирования давления кислорода, потребляемого доменными и мартеновскими цехами; *4* — блоки осушки кислорода; *5* — узел регулирования давления кислорода, расходуемого на сварку и резку; *6* — реципиент осушенного кислорода; *7* — трубопровод к потребителям сухого кислорода, имеющим свои регуляторы давления; *8* — реципиент кислорода на 27—34 *кгс/см²*; *9* — узел регулирования давления кислорода перед конверторами; *10* — конверторы.

кислорода, получение криптоно-ксеноновой смеси, технического кислорода и чистого аргона.

В основном (кислородном) цехе А размещаются воздушные турбокомпрессоры *2* с камерами *1* для воздушных фильтров, оборудованием *3* для очистки воздуха от $CO_2$ и осушки от влаги (если это предусмотрено в схеме установок), воздухоразделительными блоками *4*.

В цехе компрессии Б установлено оборудование для сжатия и подачи кислорода потребителям: кислородные компрессоры *6* среднего давления (35 *кгс/см*$^2$), компрессоры *7* высокого давления (165 *кгс/см*$^2$), подающие кислород в цех В наполнения баллонов, а также компрессоры *8*, работающие в часы наибольшего потребления кислорода параллельно с хранилищами высокого давления *10* (реципиентами). В этих хранилищах содержится запас кислорода, расходуемый в часы «пик» через редукторы *11*. Все линии подачи кислорода в случае необходимости комплектуются блоками осушки кислорода *9*. В цехе В наполнения баллонов установлены наполнительные рампы *12* и расположены склады для наполненных и порожних баллонов, а также мастерские для ремонта и испытания баллонов. В цех Б под высоким давлением подается также технический кислород кислородным насосом, установленным в цехе А. Технологический кислород из цеха А поступает в цех компрессии по трубопроводу, на ответвлении которого установлен кислородный газгольдер *5*.

Криптоно-ксеноновая смесь и аргон из цеха А подаются в цех очистки инертных газов Г, где имеется комплект оборудования *13* для очистки и обогащения криптоно-ксенонового концентрата, а также установка *14* для очистки аргона от кислорода.

В цехе очистки инертных газов при значительных масштабах производства могут быть самостоятельные отделения: одно — для очистки криптоно-ксенона и второе — для очистки аргона.

Жидкий кислород из блока разделения сливается в стационарную емкость *15* и оттуда подается в отделение Д газификации кислорода, где расположены газификаторы *16*. В это же отделение в транспортных емкостях (цистернах) доставляется жидкий кислород.

Схема снабжения кислородом конверторных цехов металлургического завода* приведена на рис. 4.3.

План и разрез кислородного цеха, оборудованного тремя крупными воздухоразделительными установками низкого давления с блоками разделения БР-1, показан на рис. 4.4. В правом (более низком) пролете установлены воздушные турбокомпрессоры с электродвигателями. В левом пролете размещены блоки разделения воздуха с турбодетандерами и щитами управления. Трубопроводы расположены на первом этаже.

* И. Р. Зусман, О. Я. Ермолаева, П. С. Компаниец, В. С. Клавдиенко. Кислородная промышленность (обзоры), № 4, Гипрокислород, 1963.



Опыт эксплуатации воздухоразделительных цехов показывает целесообразность применения в них однотипных установок большой производительности с комплексным разделением воздуха и использованием получаемых газов. Наиболее дешевый кислород получают в случае отбора его на установках чистого азота, вырабатываемого как основной продукт для соответствующих химических производств. При этом вторым продуктом является технологический

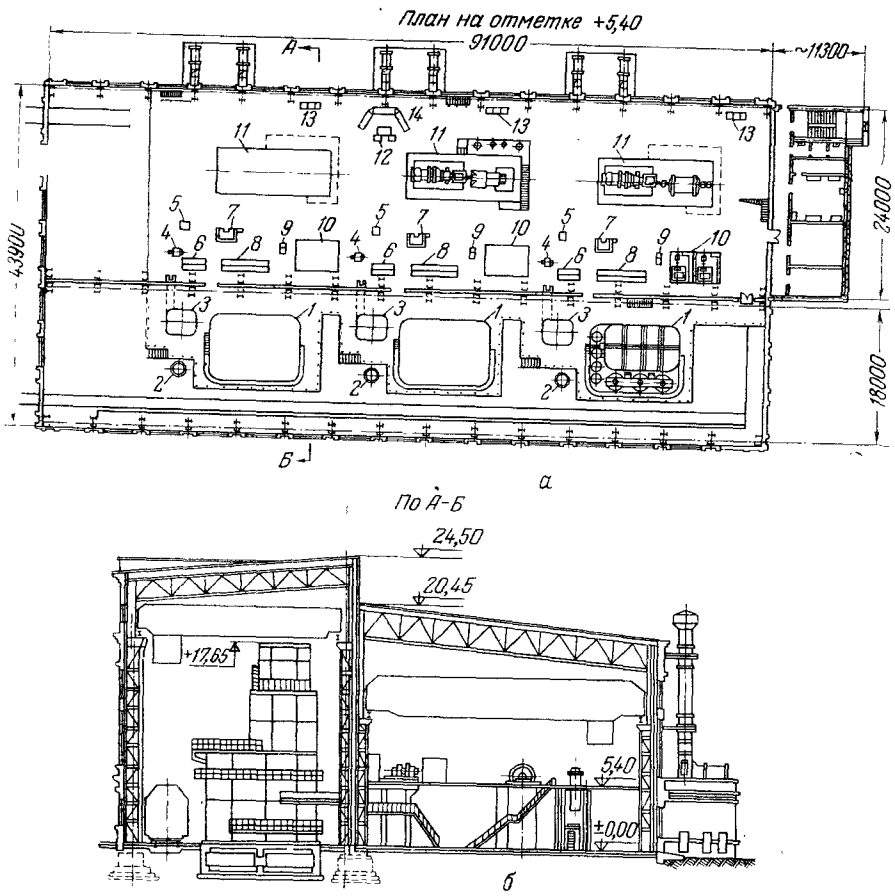



Рис. 4.4. Кислородный цех с тремя установками БР-1:

*а* — план; *б* — разрез по А—Б; *1* — блоки разделения воздуха БР-1; *1* — подогреватели воздуха; *3* — криптоновые блоки; *4* — механизмы переключения клапанов регенераторов; *5* — влагоотделители-фильтры; *6* — щиты приборов криптонового блока; *7* — пульты дистанционного управления блоком разделения; *8* — щиты приборов блока разделения; *9* — щиты управления турбодетандерами; *10* — турбодетандеры; *11* — турбокомпрессоры воздушные производительностью по 84 000 *м*$^3$/*ч*; *12* — пульты управления турбокомпрессорами; *13* — станции управления и защиты синхронного электродвигателя турбокомпрессора и двигателя постоянного тока маслонасоса; *14* — щит контрольно-измерительных приборов турбокомпрессора.

кислород, используемый для интенсификации процессов в цехах того же химического комбината.

Количество и тип воздухоразделительных установок определяют по потребности предприятия в кислороде, азоте и других газах, а также исходя из режима потребления. Поэтому возможны различные схемы комплектации оборудования, что решается на основе технико-экономических расчетов при выдаче планового задания на проектирование цеха разделения воздуха.

Для сокращения капитальных затрат и сроков строительства кислородных цехов технологическое оборудование производства продуктов разделения воздуха, если это возможно по климатическим условиям данной местности, монтируют на открытых площадках. На таких площадках размещают: блоки разделения воздуха*, хранилища жидкого кислорода и азота; хранилища высокого давления (реципиенты) для газообразного воздуха и продуктов его разделения; газификаторы для кислорода (с глухим ограждением на высоту газификатора); конденсаторы аммиачных установок; воздушные фильтры; щелочные скрубберы с паровым подогревом; испарители жидкого кислорода для аварийного слива; сосуды для щелочи; оборудование системы азотно-водяного охлаждения воздуха; мокрые газгольдеры (с подогревом воды) емкостью более 100 $м^3$ для продуктов разделения воздуха; сосуды для слива аммиака из системы.

Машины устанавливаются только внутри здания цеха. Внутри зданий должны также размещаться блоки разделения воздуха и технологическое оборудование установок производительностью до 400 $м^3/ч$, не приспособленные для эксплуатации на открытых площадках.

План и разрез цеха разделения воздуха с установками КА-5, размещенными вне здания, показаны на рис. 4.5.

В тех случаях, когда бо́льшая часть оборудования воздухоразделительной установки расположена в здании и вынос на открытую площадку отдельных аппаратов, перечисленных выше, не приводит к удешевлению строительства, вопрос об их размещении решается проектной организацией в зависимости от технико-экономических показателей и удобства эксплуатации.

В районах с повышенной температурой воздуха в летние месяцы целесообразно использовать отходящий азот в скрубберном водоиспарительном устройстве для понижения температуры охлаждающей воды и перерабатываемого воздуха, как это описано ниже в схемах установок К-0,15, Кт-12-2 и др. (см. рис. 4.17, 4.30 и др.).

Кислородный цех следует располагать на генплане так, чтобы исключить накопление в воздухоразделительном аппарате опасных количеств ацетилена и прочих углеводородов, а также других

* Кожух блока разделения при этом должен быть усилен с учетом ветровых нагрузок, а механизмы переключения клапанов регенераторов и арматура защищены от непосредственного влияния атмосферных осадков.



вредных газов, поступающих вместе с перерабатываемым воздухом. Поэтому если на площадке завода, где предполагается строительство цеха, работает ацетиленовая станция или цехи, выделяющие

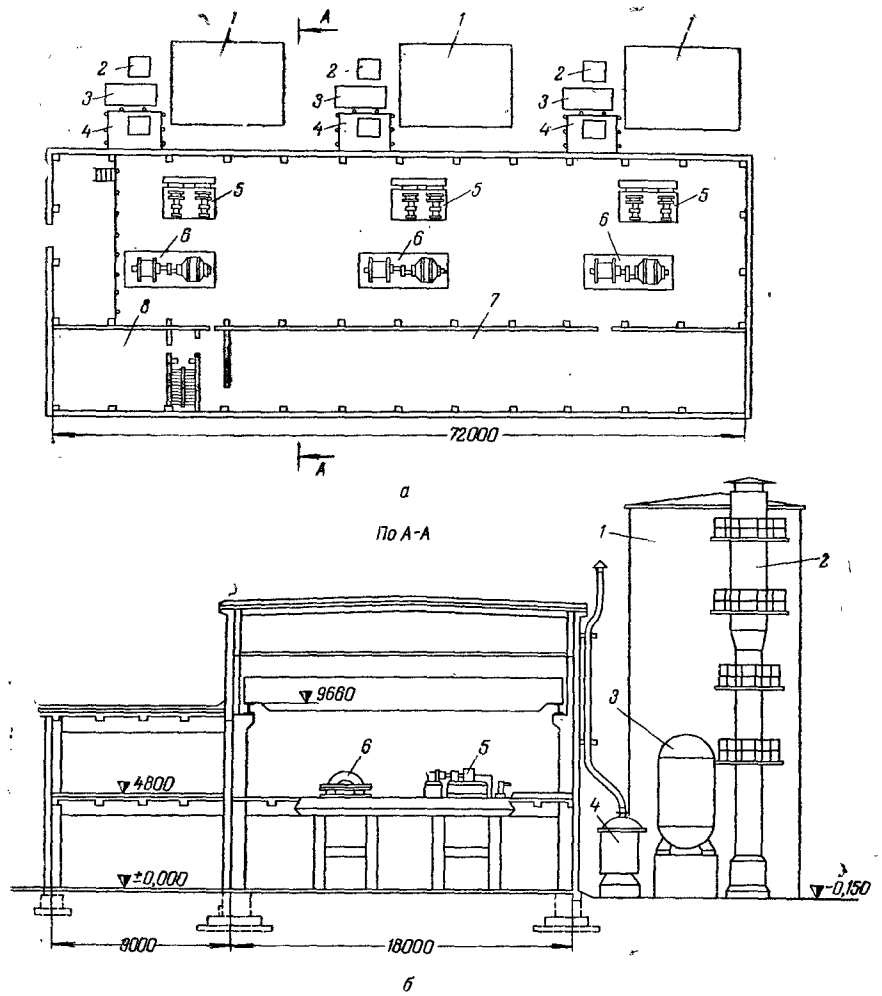



Рис. 4.5. План (*а*) и разрез (*б*) цеха разделения воздуха с установками КА-5 при размещении блоков разделения вне здания:

*1* — блоки разделения воздуха КА-5; *2* — установки азотно-водяного охлаждения; *3* — влагоотделители; *4* — испарители жидкого кислорода; *5* — турбодетандеры; *6* — воздушные центробежные компрессоры К-500-61; *7* — помещение пульта управления; *8* — вентиляционная камера (масштаб рис. *б* увеличен вдвое по сравнению с масштабом рис. *а*).

ацетилен и другие вредные газы, необходимо кислородный цех размещать с наветренной стороны по отношению к этим производствам.

Данные о предельно допустимом содержании вредных примесей в воздухе в месте его забора* приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. **Предельное содержание взрывоопасных примесей в перерабатываемом воздухе***

| Примесь | Блоки разделения | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | низкого давления | | работающие по циклам высокого, среднего и двух давлений | | |
| | с регенераторами с металлической насадкой | с регенераторами с каменной насадкой | с адсорбционными блоками осушки | с цеолитовыми блоками очистки | с аппаратами каталитической очистки воздуха от ацетилена |
| Углеводороды, *мг* углерода на 1 *м*³ | | | | | |
| ацетилена** | 0,27 / 0,25 | 0,43 / 0,4 | 0,27 / 0,25 | 1,1 / 1 | 4,65 / 5 |
| гомологи ацетилена в сумме | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,5 | 0,01 |
| предельные и непредельные в сумме $C_5$—$C_6$ | 0,05 | 0,05 | 0,05 | Не более 2,0 | 0,05 |
| $C_3$—$C_4$ (кроме пропана) | 0,3 | 0,3 | 0,3 | Не более 2,0 | 0,3 |
| этан, этилен, пропан в сумме | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Сероуглерод, *мг/м*³ | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Окислы азота, *мг/м*³ | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 |

* Определение содержания взрывоопасных примесей в воздухе производится при выборе места забора воздуха и при вводе в эксплуатацию новых цехов или установок, загрязняющих воздух углеводородными или другими взрывоопасными веществами, на предприятиях, расположенных на расстоянии менее 2 *км* от места воздухозабора.

Во время эксплуатации блоков разделения воздуха содержание взрывоопасных примесей контролируется в технологических потоках (см. гл. 13).

** В знаменателе содержание примесей в *см*³/*м*³.

Ниже приведены согласно действующим нормам минимально допустимые разрывы от местных воздухозаборов цехов разделения воздуха до источников загрязнения (в *м*):

| | |
|---|---|
| производства карбида кальция | 500 |
| отвалов шлаков металлургического и карбидного производств | 500 |
| производства синтеза аммиака, азотной кислоты и сернистых соединений, коксовых батарей | 300 |
| ацетиленовых станций | 300 |
| производств с открытым огнем (доменных, мартеновских, электросталеплавильных, конверторных, прокатных, фасонносталелитейных и т. п.) | 200 |
| производств с массовой автогенной резкой и сваркой металлов (ремонтно-механических цехов, цехов металлоконструкций и т. п.) | 200 |

* См. «Основные положения по защите от взрывов стационарных воздухоразделительных установок», составитель Файнштейн В. Н., изд. 2-е, ВНИИкриогенмаш, РТМ 26-04-11—68.



Эти разрывы определены с учетом того, что в месте забора воздуха содержание загрязняющих примесей не превышает установленных пределов. Если концентрации загрязнений выше нормы, устраиваются дальние воздухозаборы из незагрязненной зоны. В этом случае соблюдение указанных разрывов не требуется.

Дальний воздухозабор может иметь одну, две или несколько ветвей. При двух и более ветвях они переключаются в зависимости от направления ветра так, чтобы забор воздуха можно было производить из зоны, наименее загрязненной в данный момент

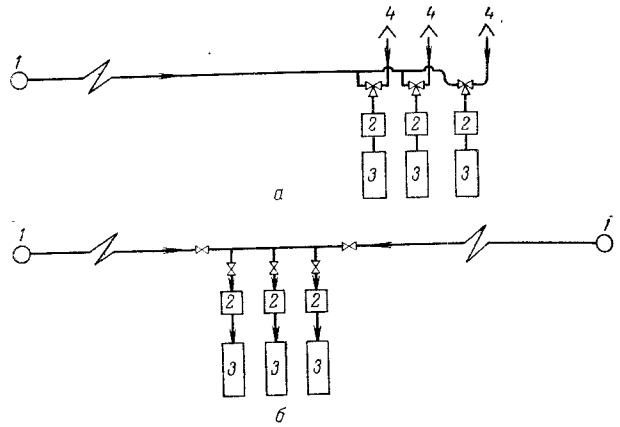



Рис. 4.6. Схемы дальних воздухозаборов:
*а* — с одной ветвью; *б* — с двумя переключаемыми ветвями;
*1* — головная шахта; *2* — фильтры; *3* — воздушные компрессоры;
*4* — местные воздухозаборы

вредными примесями. Переключение производится с помощью задвижек, автоматически включаемых в зависимости от направления господствующего ветра. На щите предусматриваются контрольные лампы, указывающие, какая ветвь воздухозабора включена.

На всасывающих концах воздухозабора устанавливают воздухозаборные шахты или трубы, которые должны быть выше окружающих строений. При повышении точки забора воздуха концентрация в нем вредных примесей существенно уменьшается. Поэтому возможны варианты забора воздуха через специальные трубы высотой до 30 *м*. Для обеспечения нормальной производительности воздушных компрессоров и воздухоразделительных блоков сопротивление головного сооружения, собственно воздухопровода и фильтрующих устройств не должно превышать 300 *мм рт. ст.* Это приводит к необходимости строить воздухопроводы большого диаметра (до 1,5 *м*), а также предохранять их от нагревания солнечными лучами (окрашивать в светлые тона, делать кровлю над ними и пр.). Должна быть обеспечена полная герметичность всей линии воздухопровода для исключения возможности подсоса

загрязненного вредными примесями воздуха. Схемы дальних воздухозаборов даны на рис. 4.6.

Устройство дальних воздухозаборов требует значительных капитальных затрат и увеличивает эксплуатационные расходы. Некоторое снижение затрат может быть достигнуто при сооружении нескольких воздухопроводов сравнительно небольшой длины, расположенных звездообразно и включаемых попеременно в зависимости от направления господствующего ветра*.

## 4.2. КЛАССИФИКАЦИЯ УСТАНОВОК

Технологический процесс разделения воздуха может быть разделен на несколько основных стадий. К ним относятся:

1) очистка воздуха от пыли и механических примесей;
2) сжатие воздуха в компрессорах;
3) очистка сжатого воздуха от двуокиси углерода;
4) осушка сжатого воздуха и очистка его от углеводородов;
5) сжижение и ректификация воздуха для разделения его на кислород и азот и для извлечения редких газов — аргона, криптоно-ксенона и неоно-гелиевой смеси;
6) накопление полученного газообразного кислорода в газгольдере или жидкого кислорода в цистерне-хранилище;
7) наполнение газообразным сжатым кислородом баллонов, подача сжатого кислорода потребителю по газопроводу или наполнение транспортных танков и цистерн жидким кислородом из стационарных танков и цистерн;
8) очистка редких газов от кислорода и азота с доведением их состава до требований ГОСТ и наполнение баллонов редкими газами.

Технологические схемы и конструкции воздухоразделительных установок определяются производительностью, концентрацией продуктов разделения, условиями эксплуатации и пр. Некоторые установки более просты, но менее экономичны в работе, другие более сложны, но зато имеют лучшие эксплуатационные показатели. По типу технологической схемы установки отличаются друг от друга:

1) способом получения холода (холодильным циклом);
2) способами очистки воздуха от двуокиси углерода и влаги;
3) схемой ректификации.

* Практика сооружения и эксплуатации дальних воздухозаборов на заводах с крупными установками показала, что при этом не всегда гарантируется снижение содержания ацетилена и других взрывоопасных примесей в перерабатываемом воздухе до безопасных пределов, увеличиваются капитальные затраты, создаются трудности при прокладке трубопроводов по территории завода и снижается производительность цеха вследствие дополнительного сопротивления на линии всасывания воздуха, а также нагрева его солнечными лучами. Поэтому ведутся исследовательские работы по разработке новых, более эффективных и дешевых способов защиты воздухоразделительных установок от взрывов (см. гл. 14).



В народном хозяйстве применяется большое число стационарных и передвижных (транспортных) воздухоразделительных установок различных типов.

Передвижные установки, размещаемые на транспортных средствах (автомашинах, прицепах, в вагонах, на судах и др.) или перевозимые в виде отдельных смонтированных агрегатов, имеют специализированное применение, и их конструкция определяется габаритами и грузоподъемностью транспортных средств, а также располагаемой энергетической мощностью на месте использования установки. Несмотря на то что технологические схемы передвижных установок обычно во многом аналогичны схемам стационарных установок, конструктивное выполнение их узлов имеет ряд особенностей. Передвижные установки составляют особую группу и в данной книге не рассматриваются.

Установки стационарного типа предназначены для использования во многих отраслях народного хозяйства и имеют различную производительность: по кислороду от 15 до 35 000 $м^3/ч$ и по азоту — от 20 до 48 000 $м^3/ч$. В зависимости от вида получаемых продуктов разделения воздуха применяются: кислородные, азотные и азотно-кислородные установки.

В соответствии с потребностью используются установки для получения продуктов с различной концентрацией, в газообразном или жидком состоянии.

Ниже рассмотрены технологические схемы некоторых современных стационарных установок, применяемых в промышленности, начиная с небольших установок простейшего типа до наиболее сложных воздухоразделительных агрегатов для комплексного разделения воздуха и получения технического и технологического кислорода, чистого азота и редких газов. Технические данные установок приведены в соответствующих таблицах (см. табл. 4.2, 4.3 и 4.4).

## 4.3. УСТАНОВКИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Установки небольшой производительности для получения технического кислорода и азота работают по холодильному циклу высокого давления; ректификация двукратная.

Установки высокого давления с однократной ректификацией отличаются простотой технологической схемы, но они неэкономичны и в настоящее время промышленностью не выпускаются.

### 4.3.1. Установка АКГ-115/18

В химических производствах наряду с кислородом иногда требуется азот с содержанием 99,9—99,95% $N_2$, используемый в качестве нейтрального газа. Газообразный азот такой концентрации и 99,5%-ный технический кислород можно одновременно получать на установке АКГ-115/18, созданной на базе кислородной установки КГ-30.

Установка АКГ-115/18 работает по циклу высокого давления с дросселированием (рис. 4.7, *а*). Холодопроизводительность цикла 5 *ккал/м*³ перерабатываемого воздуха (при 0 °С и 760 *мм рт. ст.*).

Уравнение теплового баланса установки имеет следующий вид:

$$\Delta i_{др} = Ac_p\Delta t_A + Kc_p\Delta t_K + Фc_p\Delta t_Ф + q_и \qquad (4.1)$$

где $\Delta i_{др}$ — эффект дросселирования воздуха, *ккал/м*³ перерабатываемого воздуха (п.в.);

$c_p$ — теплоемкость азота, кислорода и аргонной фракции при нормальных условиях, $c_p = 0{,}312$ *ккал/(м*³·*град)*;

$\Delta t$ — недорекуперация азота, кислорода и аргонной фракции, обычно $\Delta t = \Delta t_A = \Delta t_K = \Delta t_Ф = 8$ *град*;

$q_и$ — потери холода через изоляцию; обычно $q_и = 2{,}5$ *ккал/м*³ п. в.;

*А*, *К* и *Ф* — количества азота, кислорода и аргонной фракции, *м*³/*м*³ п. в.

Технологическая схема установки АКГ-115/18 приведена на рис. 4.8. Воздух проходит очистку от пыли и механических примесей в масляном фильтре *1* и сжимается до рабочего давления

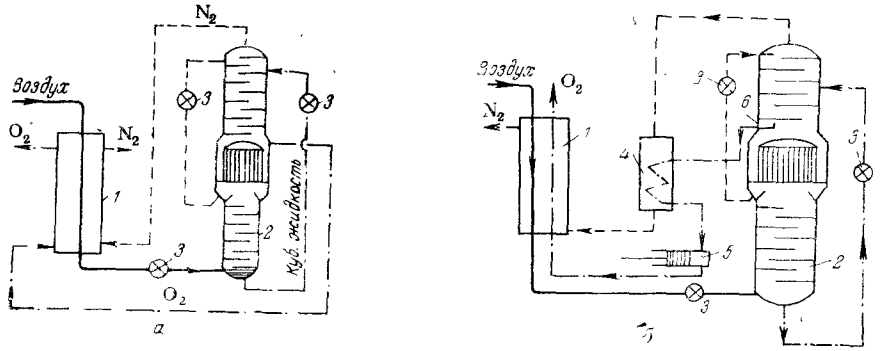



Рис. 4.7. Принципиальные схемы установок высокого давления:
*а* — с дросселированием; *б* — с дросселированием и насосом для жидкого кислорода: *1* — теплообменник; *2* — ректификационная колонна; *3* — дроссельные вентили; *4* — переохладитель жидкого кислорода; *5* — кислородный насос; *6* — сборник (карман) для жидкого кислорода.

цикла в компрессоре *2*, имеющем четыре ступени сжатия. После второй ступени при давлении около 15 *кгс/см*² воздух проходит декарбонизатор *5*, где из него удаляется двуокись углерода, поглощаемая раствором едкого натра. Этот раствор приготовляют в баке *3* и насосом *4* перекачивают в декарбонизатор. После четвертой ступени воздух, пройдя конечный холодильник и влагомаслоотделитель, поступает при давлении около 70 *кгс/см*² (при пуске 200 *кгс/см*²) в блок адсорбционной осушки *6*, где осушается активным глиноземом от остатков влаги. Затем сжатый, очищенный от $CO_2$ и осушенный воздух поступает в теплообменники воздухоразделительного аппарата *7*, где охлаждается за счет холода отходящих из аппарата газообразных кислорода, чистого азота



и аргонной фракции, а затем подвергается разделению в колонне двукратной ректификации *15*. Воздух при входе в аппарат делится на два потока: один идет в основной теплообменник *17*, а другой — в теплообменник аргонной фракции *18*. После теплообменников воздух поступает в змеевик куба ректификационной колонны *15* и через дроссельный вентиль подается на 6-ю тарелку нижней колонны.

Кубовая жидкость подается через соответствующий дроссельный вентиль на 24-ю тарелку верхней колонны, пройдя предварительно

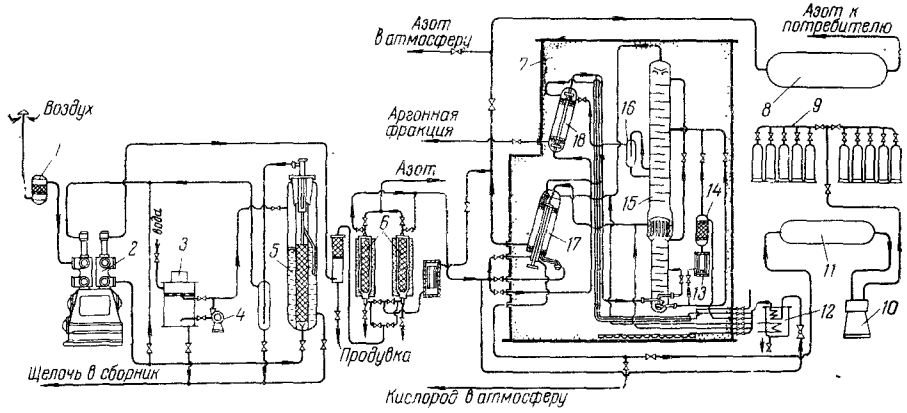



Рис. 4.8. Технологическая схема установки АКГ-115/18:
*1* — фильтр для воздуха; *2* — воздушный компрессор; *3* — бак для приготовления раствора едкого натра; *4* — центробежный насос для перекачки раствора едкого натра; *5* — декарбонизатор; *6* — блок адсорбционной осушки воздуха; *7* — воздухоразделительный аппарат; *8* — газгольдер для азота; *9* — наполнительная рампа для кислородных баллонов; *10* — кислородный компрессор; *11* — газгольдер для кислорода; *12* — подогреватель воздуха для отогревания воздухоразделительного аппарата; *13* — фильтр для удержания частиц двуокиси углерода; *14* — адсорбер ацетилена; *15* — колонна двукратной ректификации; *16* — сепаратор жидкости; *17* — основной теплообменник; *18* — теплообменник аргонной фракции.

фильтр *13* для поглощения двуокиси углерода и адсорбер ацетилена *14*. Аргонная фракция отбирается с 15-й тарелки верхней колонны и через сепаратор жидкости *16* отводится в теплообменник *18*, а затем в атмосферу. Часть азота после теплообменника *17* используется для регенерации активного глинозема в блоке осушки воздуха.

Верхняя (48-я) тарелка верхней колонны орошается жидким азотом, подаваемым через азотный дроссельный вентиль из карманов конденсатора. Газообразный кислород из блока разделения поступает в газгольдер *11* и затем накачивается в баллоны компрессором *10* через рампу *9*. Газообразный чистый азот поступает в газгольдер *8*, откуда направляется к потребителю. Аргонная фракция выбрасывается в атмосферу. Аппарат отогревается воздухом, подогреваемым в подогревателе *12*.

**Техническая характеристика установки АКГ-115/18**

| | |
|---|---|
| Производительность, *м³/ч* | |
| кислород технический | 18 |
| азот чистый | 115 |
| Давление, *кгс/см²* | |
| после теплообменника | 60—90 |
| в нижней колонне | 4,5—5 |
| в верхней колонне | 0,3—0,5 |
| Разность температур на теплых концах теплообменников, *град* | 6—10 |
| Концентрация, % | |
| кислорода в готовом продукте | 99,5 |
| азота в готовом продукте | 99,8 |
| жидкого азота в карманах | 100 |
| кислорода в кубовой жидкости | 35—38 |
| азота в аргонной фракции | 10 |
| Уровень столба жидкости, *см* | |
| кислорода в конденсаторе | 30—35 |
| кубовой жидкости в испарителе | 10—15 |
| Продолжительность рабочей кампании, месяцы | 1 |
| Чистое время работы на выдачу продукции (без капитального ремонта) в год, *ч* | 8150 |
| Время на пуск и отогрев, *ч* | 25 |
| Удельный расход электроэнергии, *квт·ч/м³* ($N_2 + O_2$) | 0,4—0,5 |
| Вес блока разделения, *Т* | 2,5 |
| в том числе минеральной ваты | 1,45 |

## 4.4. УСТАНОВКИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С НАСОСОМ

В этих установках жидкостной насос заменяет компрессор для сжатия получаемых продуктов до требуемого потребителем давления и наполнения баллонов получаемыми газами (кислородом, азотом, аргоном). Применение насоса делает установку более компактной, упрощает ее обслуживание, обеспечивает получение газов, не содержащих влаги, и поэтому не требующих дополнительной осушки.

Принципиальная схема установки высокого давления с жидкостным насосом показана на рис. 4.7, *б*. В жидкостной насос отбирается жидкий кислород из сборника *6* (кармана), расположенного под нижней тарелкой верхней колонны. Перед поступлением в насос кислород переохлаждается отходящим азотом в переохладителе *4*, что предупреждает возможность вскипания жидкого кислорода при всасывании его в цилиндр насоса. Испарение сжатого кислорода производится в основном теплообменнике *1* за счет теплоты поступающего сжатого воздуха.

Рабочее давление в установках с насосом выше, чем в установках высокого давления, работающих с кислородным компрессором (где оно составляет от 50 до 70 *кгс/см²*). Это вызвано тем, что в установках с кислородным насосом к обычным холодопотерям через изоляцию и от недорекуперации в теплообменнике добавляются еще потери от работы кислородного насоса. Ниже



приводятся основные причины дополнительных потерь, связанных с включением в цикл насоса.

Недоиспользование эффекта дросселирования воздуха вследствие отбора кислорода под давлением (дроссель-эффект кислорода, отводимого из аппарата при избыточном давлении до 165 *кгс/см²*, входит в тепловой баланс со знаком, противоположным знаку дроссель-эффекта воздуха). Величина этой потери может быть учтена путем замены в тепловом балансе величины теплоемкости кислорода $C_p$ при абсолютном давлении 1 *кгс/см²* теплоемкостью кислорода $C_p'$ при абсолютном давлении выхода из теплообменника аппарата (поскольку $C_p'$ больше $C_p$).

Производство работы для преодоления давления кислорода в баллоне или кислородопроводе, на что затрачивается дополнительная энергия цикла.

Компенсация притока тепла, как выделяющегося в насосе вследствие трения, так и поступающего из окружающей среды (за счет теплопроводности частей насоса).

Потери от утечки холодного кислорода в атмосферу через сальник насоса (зависят от конструкции и состояния насоса и могут быть полностью исключены).

Потребное для покрытия дополнительных потерь увеличение холодопроизводительности цикла обеспечивается повышением избыточного давления сжатия воздуха до 110—120 *кгс/см²* (см. гл. 3, пример 14).

Уравнение теплового баланса цикла установки высокого давления с насосом имеет вид:

$$\Delta i_{\text{др}} = Ac_p\Delta t_A + Kc_p\Delta t_K + K\left(\frac{1}{427}Lp_K + q_{\text{нас}} + \Delta i^K_{\text{др}}\right) + q_{\text{и}} \qquad (4.2)$$

где $\Delta t_A$ и $\Delta t_K$ — недорекуперация азота и кислорода;

$\Delta t_A = \Delta t_K = 6$ *град*;

$\frac{1}{427}Lp_K$ — работа на перекачивание жидкого кислорода, *ккал/м³*;

$\frac{1}{427}Lp_K = \frac{1}{427}p_K v$; где

$\frac{1}{427}$ — тепловой эквивалент механической работы, *ккал/(кгс·м)*;

$p_K$ — среднее давление сжатия, $p_K = 100 \cdot 10^4$ *кгс/м²*;

$v$ — удельный объем жидкого кислорода при температуре 85 °К;

$v = \frac{1}{1190}$ *м³/кг*;

$q_{\text{нас}}$ — потери холода за счет теплоты трения и теплопритока из окружающей среды, $q_{\text{нас}} = 3{,}5$ *ккал/м³* $O_2$;

$\Delta i^K_{\text{др}}$ — дроссель-эффект сжатого кислорода, $\Delta i^K_{\text{др}} = i^1_{294} - i^{100}_{294} = 154{,}3 - 144 = 10{,}3$ *ккал/м³*, где $i^1_{294} = 108{,}1$ *ккал/кг* или $i^1_{294} = 108{,}1 \cdot 1{,}429 = 154{,}3$ *ккал/м³*; $i^{100}_{294} = 100{,}9$ *ккал/кг* или $i^{100}_{294} = 100{,}9 \cdot 1{,}429 = 144{,}0$ *ккал/м³*;

$q_{\text{и}}$ — потери холода через изоляцию в окружающую среду, $q_{\text{и}} = 2{,}5$ *ккал/м³* п.в.

Остальные обозначения те же, что и в уравнении (4.1).

## 4.4.1. Установки К-0,04 (КГН-30) и К-0,04Т (КГН-30Т)*

**Установка К-0,04.** Технологическая схема такой установки производительностью 30 *м³/ч* кислорода показана на рис. 4.9. Воздух проходит через фильтр *1* для очистки от механических примесей, затем сжимается в вертикальном четырехступенчатом компрессоре *2* и охлаждается в промежуточных холодильниках. Производительность компрессора 180 *м³/ч***.

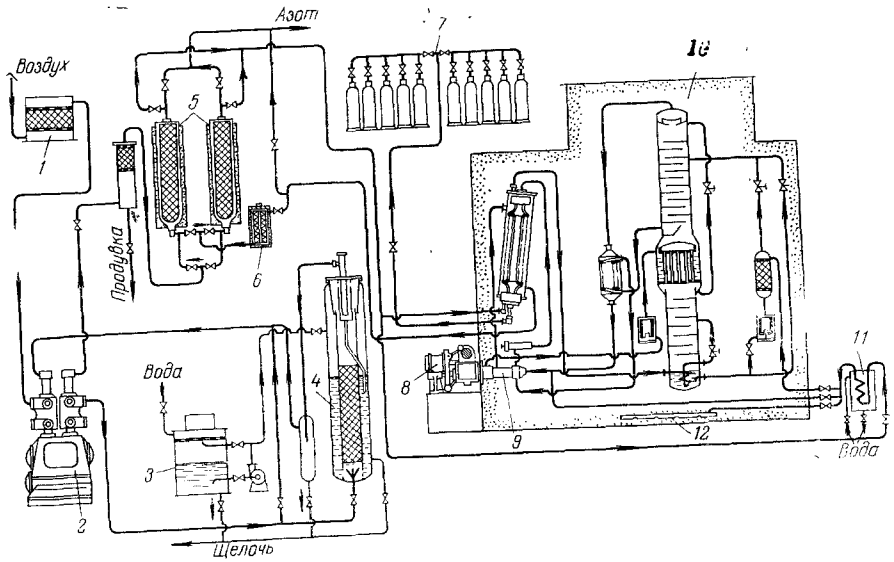



Рис. 4.9. Технологическая схема установки К-0,04:
*1* — воздушный фильтр; *2* — воздушный компрессор; *3* — бак для приготовления раствора щелочи; *4* — декарбонизатор; *5* — блок адсорбционной осушки; *6* — электроподогреватель азота; *7* — наполнительная рампа; *8* — электродвигатель насоса жидкого кислорода; *9* — насос жидкого кислорода; *10* — блок разделения воздуха; *11* — электроподогреватель воздуха; *12* — труба подвода воздуха для отогревания изоляции.

Очистка воздуха от двуокиси углерода производится под избыточным давлением 12—16 *кгс/см²* в декарбонизаторе *4*, включенном после II ступени воздушного компрессора. Раствор щелочи для декарбонизатора приготовляется в баке *3*. Сжатый в компрессоре воздух подвергается осушке в двух попеременно работающих баллонах блока осушки *5*, заполненных активным глиноземом. После осушки воздух поступает в блок разделения *10* с колонной двукратной ректификации, где разделяется на кислород и азот. Жидкий кислород отбирается из кармана, припаянного ниже первой тарелки верхней колонны и перекачивается плунжерным кислородным насосом *9* в теплообменник блока разделения *10*, где кислород испаряется под избыточным давлением до 150—165 *кгс/см²*, охлаждая поступающий в теплообменник сжатый воздух. Баллоны наполняются газообразным кислородом через рампу *7*.

* В скобках дана прежняя индексация типов установок.

** Установка К-0,04 может комплектоваться воздушным компрессором производительностью 210 *м³/ч*, тогда ее производительность составляет около 35 *м³/ч* кислорода.



Установка К-0,04 не имеет газгольдера, компактна и может быть размещена на площади размером 70 *м²*. Получаемый кислород не содержит влаги и поэтому не требует дополнительной осушки. Сухой кислород не вызывает коррозии баллонов, а кислородные редукторы и трубопроводы не замерзают. Избыточное давление воздуха при запуске установки составляет 200—220 *кгс/см²*, а в установившемся режиме — 100—110 *кгс/см²*.

Схема блока разделения воздуха установки К-0,04 изображена на рис. 4.10. Сжатый воздух после блока осушки поступает в теплообменник *1*, охлаждается отходящим азотом и жидким кислородом, а затем по змеевику испарителя *9* направляется в середину нижней колонны *11* через дроссельный вентиль Р-1, где избыточное давление воздуха снижается до 5,5—6 *кгс/см²*. Жидкий, обогащенный кислородом воздух из испарителя *9* через керамический фильтр *12*, предназначенный для удержания частиц твердой двуокиси углерода, направляется в адсорбер *14*, наполненный силикагелем, адсорбирующим ацетилен, растворенный в жидком воздухе. Очищенный от ацетилена жидкий воздух поступает на орошение верхней колонны *18* через дроссельный вентиль Р-2, в котором избыточное давление воздуха снижается до 0,5—0,6 *кгс/см²*.

В трубках конденсатора *16* сжижаются пары азота, поднимающиеся из нижней колонны *11*. Часть образующейся при этом жидкости, богатой азотом, стекает вниз по насадке колонны, вследствие чего происходит первичная ректификация воздуха. Другая часть жидкого азота собирается в карманах *13* конденсатора, дросселируется вентилем Р-4 до избыточного давления 0,5—0,6 *кгс/см²* и подается на орошение верхней тарелки колонны *18*. Жидкий кислород из кармана *17* проходит через переохладитель *15* и поступает в насос *4*, который подает его в трубки *2* теплообменника *1*. Кислородные трубки *2* расположены внутри нескольких воздушных трубок теплообменника. Здесь жидкий кислород испаряется за счет тепла поступающего сжатого воздуха и в виде газа под давлением, постепенно повышающимся до конечного избыточного давления 150—165 *кгс/см²*, поступает в баллоны. Фильтр *3* служит для очистки сжатого кислорода от механических примесей, которые могут попасть в него вследствие истирания графитового уплотнения поршня насоса.

Азот из колонны *18* проходит через переохладитель *15*, затем поступает в охлаждающую рубашку *5* насоса *4* жидкого кислорода и через теплообменник *1* уходит в атмосферу. Переохладитель *15* и рубашка *5* служат для переохлаждения жидкого кислорода ниже температуры его кипения при данном давлении. Этим

предотвращается испарение жидкого кислорода при поступлении его в цилиндр насоса через всасывающий клапан и достигается требуемая степень заполнения цилиндра жидкостью. Кислород,

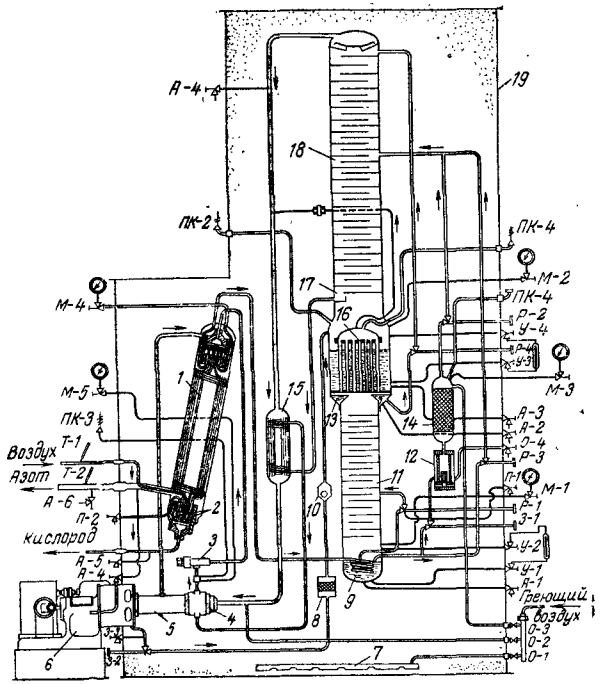



Рис. 4.10. Схема блока разделения воздуха установки К-0,04:

*1* — теплообменник; *2* — кислородные трубки теплообменника; *3* — керамический фильтр кислородного насоса; *4* — насос жидкого кислорода, *5* — охлаждающая рубашка кислородного насоса; *6* — привод кислородного насоса; *7* — труба ввода теплого воздуха в изоляцию; *8* — фильтр на линии отвода кислорода из сальника насоса; *9* — испаритель нижней колонны; *10* — обратный клапан; *11* — нижняя колонна; *12* — керамический фильтр для воздуха; *13* — карманы конденсатора; *14* — адсорбер ацетилена; *15* — переохладитель жидкого кислорода; *16* — конденсатор; *17* — карман отбора жидкого кислорода в насос; *18* — верхняя колонна; *19* — кожух блока. Обозначения арматуры: *М* — манометры; *ПК* — предохранительные клапаны, *Т* — термометры; вентили: *А* — анализные; *П* — продувочные; *З* — запорные; *У* — указателей уровня; *О* — отогревательные; Р-1 — дроссельный воздушный; Р-2 и Р-3 — дроссельные кубовой жидкости, Р-4 — дроссельный азотный.

просочившийся через сальник плунжера насоса, направляется через фильтр *8* и обратный клапан *10* в газовое пространство конденсатора. Все аппараты блока разделения заключены в кожух *19*, заполненный теплоизоляционным материалом (минеральной ватой).

Отогревание изоляции производится подачей теплого воздуха через трубу *7*. Привод *6* кислородного насоса работает от электродвигателя переменного тока и передает движение плунжеру через редуктор и кулисный механизм.



Удельный расход электроэнергии с учетом наполнения баллонов кислородом составляет 1,5—1,7 *квт·ч* (5400—6120 *кдж*) на 1 $м^3$ $O_2$.

**Установка К-0,04Т.** Эта установка предназначена для работы в условиях жаркого и влажного тропического климата при температуре окружающей среды до +50 °С, температуре охлаждающей воды до +40 °С и при повышенной влажности воздуха. Установка К-0,04Т по сравнению с установкой К-0,04 имеет следующие особенности.

1. Снабжена азотно-водяным холодильником, охлаждающим воздух перед блоком осушки, поскольку при высокой температуре воздуха осушающая способность активного глинозема резко снижается. Азотно-водяной холодильник состоит из скруббера-водоохладителя и воздушного холодильника. В скруббере размещаются сливные тарелки, орошаемые водой. Навстречу стекающей воде направлен поток отходящего из блока разделения сухого азота, который испаряет часть воды и охлаждает ее с 40—50 до 5—12 °С. Этой водой воздух охлаждается перед поступлением в блок осушки примерно до 10 °С. Азотно-водяной холодильник рассчитан на охлаждение 300 $дм^3/ч$ воды; снаружи он снабжен теплоизоляцией во избежание конденсации на его поверхности влаги окружающего воздуха, имеющего более высокую температуру.

2. В блоке осушки применены двухгорловые баллоны с увеличенной высотой слоя адсорбента; фильтры для улавливания пыли размещены в отдельном корпусе, что упрощает их обслуживание.

3. Последовательно включены два декарбонизатора, что обеспечивает более надежную очистку воздуха от двуокиси углерода при повышенной температуре окружающего воздуха.

4. Сжатие воздуха производится в пятиступенчатом вертикальном компрессоре 2РВ-3/220Т, в котором конечная температура воздуха после каждой ступени не превышает 150 °С даже при высокой температуре окружающего воздуха. Это исключает разложение масла в цилиндрах компрессора.

Режим работы установки К-0,04Т характеризуется следующими показателями:

| | |
|---|---|
| Производительность по кислороду, $м^3/ч$ | До 30 |
| Концентрация, % | |
| кислорода | 99,5 |
| азота (отбросного) | 97,5 |
| Давление избыточное (после блока разделения), $кгс/см^2$ | |
| кислорода | 165 |
| азота | До 0,01 |
| Продолжительность пускового периода, *ч* | 10 |
| Рабочее избыточное давление воздуха, $кгс/см^2$ | 120 |

При температуре окружающей среды 50 °С, охлаждающей воды 40 °С и концентрации кислорода 99,5% производительность установки по кислороду составляет не менее 25 $м^3/ч$.

Расход электроэнергии (включая сжатие кислорода до избыточного давления 165 $кгс/см^2$) составляет в зависимости от условий

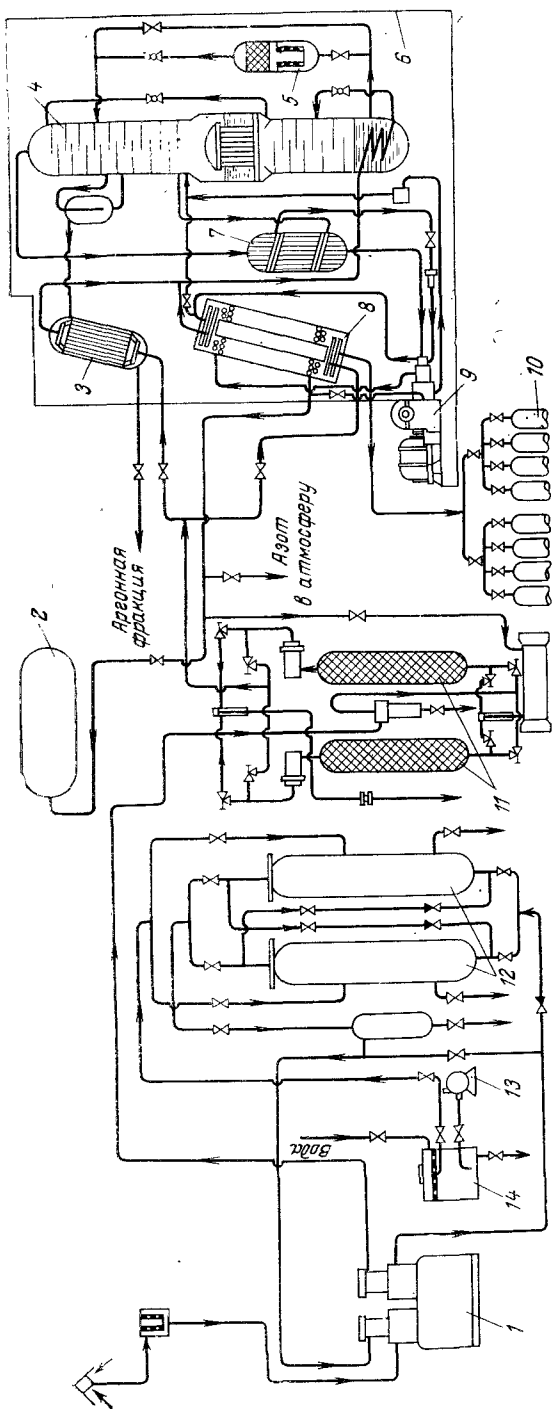



Рис. 4.11. Технологическая схема установки АК-0,1:

1 — воздушный компрессор; 2 — газгольдер для азота; 3 — теплообменник аргонной фракции; 4 — воздухоразделительный аппарат; 5 — фильтр-адсорбер; 6 — кожух блока разделения; 7 — переохладитель; 8 — основной теплообменник; 9 — насос для жидкого кислорода; 10 — наполнительная рампа; 11 — блок осушки воздуха; 12 — декарбонизаторы, 13 — насос для раствора едкого натра; 14 — бак для приготовления раствора едкого натра.

работы от 1,8 до 2,5 *квт·ч* (от 6480 до 9000 *кдж* на 1 $м^3$ кислорода). Продолжительность рабочей кампании установки не менее 20 суток.

### 4.4.2. Установка АК-0,1 (АКГН-115/18)

Установка АК-0,1 создана на базе установки К-0,04 и предназначена для одновременного получения чистого азота и технического кислорода. Для этого в ней используется колонна двукратной ректификации; верхняя колонна имеет 48 тарелок и снабжена устройством для отбора «грязной» аргонной фракции.

Рекуперация холода отводимой в атмосферу аргонной фракции проводится в дополнительном теплообменнике; теплоносителем является часть сжатого воздуха, отбираемая из трубопровода перед основным теплообменником и направляемая затем после теплообменника «грязной» аргонной фракции в змеевик куба нижней колонны вместе с воздухом после основного теплообменника.

Технологическая схема установки АК-0,1 приведена на рис. 4.11. Азот высокой концентрации отбирается из верхней части колонны и через теплообменник поступает в мягкий газгольдер. Если требуется азот под повышенным давлением или в баллонах, то к установке добавляют азотный компрессор, рассчитанный на соответствующее давление сжатия. Кислород отбирается из верхней колонны с нижней тарелки в жидком виде и через переохладитель поступает в насос, которым через теплообменник (где $O_2$ испаряется) накачивается в газообразном виде в баллоны под избыточным давлением 165 *кгс/см*$^2$.

**Техническая характеристика установки АК-0,1**

| | |
|---|---|
| Количество перерабатываемого воздуха, $м^3/ч$ | 180 |
| Производительность, $м^3/ч$ | |
| кислород | 18 |
| азот | 120 |
| в том числе | |
| продукционный | 95 |
| для регенерации адсорбента в блоке осушки | 25 |
| Концентрация, % | |
| азота | 99,9 |
| кислорода | 99,2 |
| Давление воздуха, *кгс/см*$^2$ | |
| при пуске | 200—220 |
| в установившемся режиме | 100—110 |
| Продолжительность | |
| пускового периода, *ч* | 10 |
| рабочей кампании, сутки | 30 |
| отогревания, *ч* | 10 |
| Удельный расход электроэнергии, *квт·ч/м*$^3$ $(O_2 + N_2)$ | 0,4—0,5 |

Концентрация азота, получаемого на данной установке, может быть и выше 99,9% при соответствующем уменьшении его отбора и одновременном увеличении отбора «грязной» аргонной фракции.

### 4.4.3. Установка КжАж-0,04

Установка КжАж-0,04 применяется в производствах, где в качестве нейтральной среды используется газообразный чистый азот (например, при получении пластмасс и капролактама, изготовлении радиоламп и др.), а также жидкий азот в качестве хладоагента и кислород для сварки и резки. Она предназначена для получения:

1) 40 *м³/ч* газообразного технического и медицинского кислорода концентрации 99,7%;
2) 36 *кг/ч* жидкого кислорода концентрации 99,7%;
3) 36 *кг/ч* жидкого азота концентрации 99,5%;
4) 40 *м³/ч* газообразного азота концентрации 99,5%.

Одновременно можно получать только один из указанных продуктов — в жидком или газообразном виде.

Блок разделения установки работает по циклу высокого давления с дросселированием и детандером. Часть воздуха, расширившаяся в детандере, подается в куб колонны высокого давления. Весь перерабатываемый воздух очищается от двуокиси углерода и влаги в цеолитовом блоке очистки и осушки перед поступлением в блок разделения. Получаемый газообразный кислород или азот накачивают в баллоны или реципиенты под давлением до 150—200 *кгс/см²* с помощью жидкостного насоса. Жидкий кислород или азот сливается в сосуды Дьюара или другие емкости.

Установка КжАж-0,04 может работать при окружающей температуре от —40 до +40 °С и относительной влажности воздуха до 96%. Установка комплектуется воздушным компрессором завода «Борец» тип 202ВП4/220, цеолитовым блоком очистки на 400 *м³/ч* (при 760 *мм рт. ст.* и 20 °С) и жидкостным насосом 1-НСГ-1 (200 *кгс/см²*) и детандером ДВД-9. Все оборудование блока разделения воздуха заключено в металлический кожух, заполненный тепловой изоляцией.

Технологическая схема установки дана на рис. 4.12. Атмосферный воздух засасывается через фильтр *19* в I ступень компрессора *18* и сжимается последовательно в пяти ступенях, проходя после каждой из них холодильники и масло-влагоотделители. Сжатый до давления 200 *кгс/см²* (при пуске или получении жидкого кислорода и азота) или 100—110 *кгс/см²* (при получении газообразного кислорода или азота) воздух направляется в ожижитель *13*, установленный в блоке разделения, где охлаждается отходящим отбросным азотом до плюс 5 — плюс 10 °С. При этом содержащиеся в воздухе водяные пары конденсируются и собираются во влагоотделителе, установленном перед блоком очистки, а затем удаляются продувкой. Далее воздух поступает в один из адсорберов *21* блока очистки и осушки, где двуокись углерода, влага и ацетилен поглощаются цеолитом. Очищенный от этих примесей воздух затем вновь направляется в блок разделения. При получении жидких кислорода или азота поток воздуха разделяется на два: один из них (до 56%) направляется в поршневой детандер *17*, а второй (до 44%) — в теплообменник *12*. После расширения в детандере воздух проходит через фильтр *14*, где очищается от масла, уносимого из цилиндра детандера, и направляется в детандерный теплообменник *10*, охлаждается в нем обратным потоком отходящего азота до температуры насыщения и поступает в куб *9* колонны высокого давления *7*.



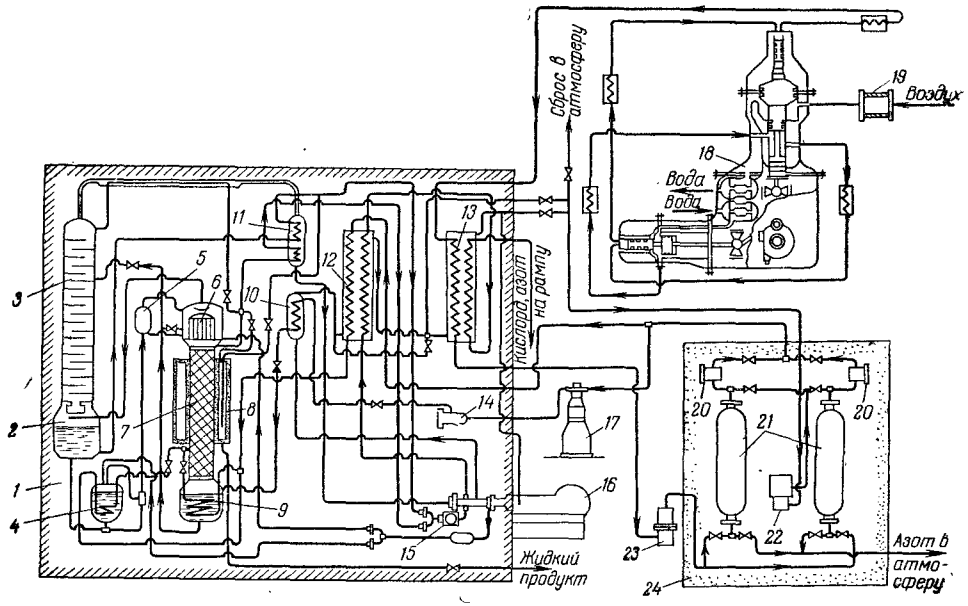



Рис. 4.12. Принципиальная технологическая схема установки КжАж-0,04:

*1* — кожух блока разделения воздуха; *2* — сборник колонны низкого давления; *3* — колонна низкого давления; *4* — испаритель парлифта; *5* — отделитель пара парлифта; *6* — конденсатор колонны высокого давления; *7* — колонна высокого давления; *8* — сборник жидкого кислорода или жидкого азота; *9* — испаритель (куб) колонны высокого давления; *10* — детандерный теплообменник, *11* — переохладитель жидкого кислорода и жидкого азота; *12* — теплообменник; *13* — ожижитель; *14* — фильтр детандерного воздуха; *15* — фильтры; *16* — насос жидкого кислорода и азота; *17* — поршневой детандер; *18* — воздушный компрессор; *19* — воздушный фильтр; *20* — фильтры блока очистки и осушки; *21* — адсорберы блока очистки и осушки; *22* — электроподогреватель азота; *23* — фильтр; *24* — кожух блока очистки и осушки.

Для того чтобы обогащенная кислородом жидкость из куба колонны не могла попасть в фильтр детандерного воздуха (содержащий масло, которое может вызвать взрыв в фильтре), на линии между детандерным теплообменником и кубом колонны установлен обратный клапан. Второй поток воздуха охлаждается в теплообменнике *12* обратным потоком отходящего азота. При получении жидкого кислорода воздух после этого теплообменника разделяется на два потока: один из них проходит через змеевик испарителя *9* колонны высокого давления, а другой — через змеевик испарителя парлифта *4*. В этих змеевиках воздух охлаждается, частично кои-

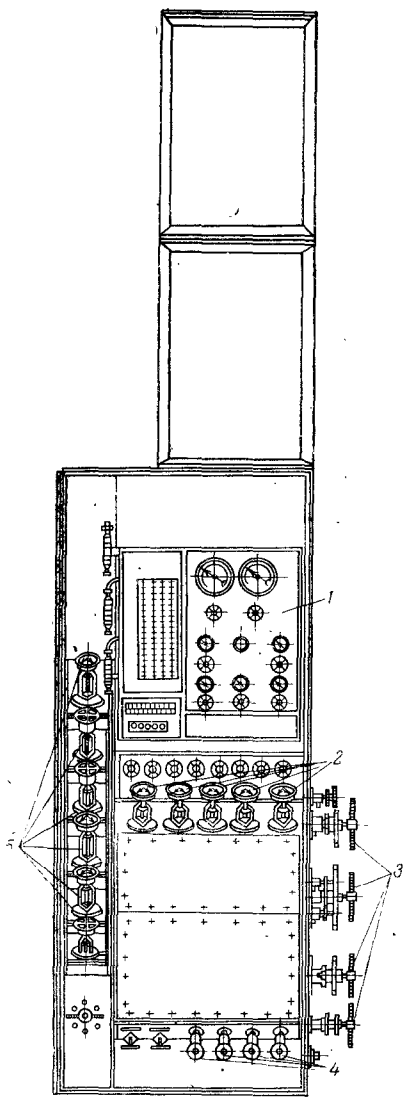



Рис. 4.14. Общий вид блока разделения воздуха установки КжАж-0,04:

*1* — щит блока разделения; *2* — дроссельные вентили; *3* — отогревательные вентили; *4* — продувочные вентили; *5* — запорные и регулирующие вентили.

денсируется и в виде паро-жидкостной смеси поступает через соответствующие дроссельные вентили на ректификацию в колонну низкого давления *3*. Обогащенная кислородом жидкость из куба колонны *7* через дроссельный вентиль подается в качестве флегмы на 27-ю тарелку колонны низкого давления *3*.

Пар из куба колонны *7* поднимается вверх по насадке колонны, обогащается азотом и конденсируется в трубках конденсатора *6*, в межтрубном пространстве которого кипит кислород, поступающий из сборника *2* колонны низкого давления *3* через испаритель *4*, форсунку и отделитель пара *5* парлифта. Жидкий азот из карманов конденсатора через дроссельный вентиль подается на орошение верхней тарелки колонны *3*.

Испарившаяся часть кислорода из конденсатора *6* направляется под нижнюю тарелку колонны *3* для использования в процессе ректификации. В колонне *3* воздух окончательно разделяется на чистый кислород и отбросный азот. Жидкий кислород из сборника *2* колонны *3* подается в переохладитель *11*, а затем через вентиль сливается в емкость *8*, расположенную вокруг колонны *7*. Из этой емкости жидкий кислород выдается потребителю.

При получении жидкого азота воздух после теплообменника *12* проходит через змеевик испарителя *9* и подается через дроссельный вентиль в колонну *7* для ректификации. При этом второй дроссельный вентиль закрыт и парлифт не работает. Из испарителя *9* колонны *7* обогащенный кислородом воздух подается в



межтрубное пространство конденсатора *6* через соответствующий дроссельный вентиль, являясь хладоагентом для конденсации паров азота в трубках конденсатора. Сконденсированный азот из карманов конденсатора *6* сливается в сборник *8*, расположенный вокруг колонны *7*, откуда переливается в сосуд Дьюара или другую транспортную емкость.

При получении газообразных продуктов разделения весь воздух высокого давления после блока очистки и осушки направляется в теплообменник *12*, где охлаждается обратными потоками: отходящего азота (отбросного газа) и готового продукта (кислорода или азота). Детандер включается только при пуске установки для сокращения пускового периода.

В ожижителе *13* воздух охлаждается также обратными потоками отбросного газа и получаемого продукта (кислорода или азота).

Жидкий кислород из сборника *2* колонны *3* (или сборника *8* колонны *7*) подается в насос *16* для сжиженных газов, проходя предварительно переохладитель *11* и сетчатый фильтр *15*, и направляется в трубки теплообменника *12* и ожижителя *13*, где испаряется; затем в виде сжатого газа через наполнительную рампу поступает в баллоны, заполняя их под давлением до 165—200 *кгс/см*$^2$.

При получении газообразного чистого азота жидкий азот отбирается из карманов конденсатора *6* (или из сборника *8*) колонны *7* и через переохладитель *11* подается в насос *16*, а затем через теплообменник *12* и ожижитель *13* поступает в виде газа под необходимым давлением в баллоны через наполнительную рампу. Температуру сжатого кислорода или азота после выхода из ожижителя *13* поддерживают на 3—8 *град* ниже температуры воздуха, поступающего в ожижитель из компрессора.

При работе жидкостного насоса происходит утечка (через зазор между плунжером и втулкой цилиндра) кислорода или азота, которые возвращаются обратно в колонну, проходя по пути через фильтр *15* из пористого металла для очистки от частиц графита.

Схема блоков разделения и очистки воздуха установки КжАж-0,04 показана на рис. 4.13 (см. Приложение). На рис. 4.14 дан общий вид блока разделения.

**Техническая характеристика установки КжАж-0,04**

| | |
|---|---|
| Количество перерабатываемого воздуха (при 20 °С, 760 *мм рт. ст.*), *м*$^3$/*ч* | 240±5% |
| Производительность | |
| кислород | |
| газообразный, *м*$^3$/*ч* | 40 |
| жидкий, *кг/ч* | 36 |
| азот | |
| газообразный, *м*$^3$/*ч* | 40 |
| жидкий, *кг/ч* | 36 |
| Концентрация продуктов разделения, %, не менее | |
| кислород | 99,7 |
| азот | 99,5 |

| | |
|---|---|
| Давление воздуха, *кгс/см²* | 200 |
| Максимальное давление газообразного кислорода или азота на выходе из блока разделения, *кгс/см²* | 200 |
| Удельный расход электроэнергии (при 20 °С и 760 *мм рт. ст.*), *квт·ч/м³* $O_2$ | 2 |
| Продолжительность | |
| полного отогрева, *ч* | 5 |
| рабочей кампании, сутки | 30 |
| Размеры помещения для установки, *м* | 12×6×6 |
| Общий вес, *Т* | 8 |

На базе установки КжАж-0,04 выпускается установка АжА-0,04 для получения 36—40 *кг/ч* чистого (99,998%-ного) жидкого или 40—50 *м³/ч* газообразного азота под давлением 165—200 *кгс/см²*. Она отличается от установки КжАж-0,04 лишь тем, что не имеет ректификационной колонны низкого давления. Для ректификации применена колонка тарельчатого типа, работающая при избыточном давлении до 6 *кгс/см²*. Удельный расход энергии составляет 1,22 *квт·ч/м³* продукта.

## 4.5. УСТАНОВКИ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ

В этих установках используется более экономичный холодильный цикл среднего давления с расширением воздуха в поршневом детандере. Поэтому удельный расход энергии ниже, чем в установках высокого давления.

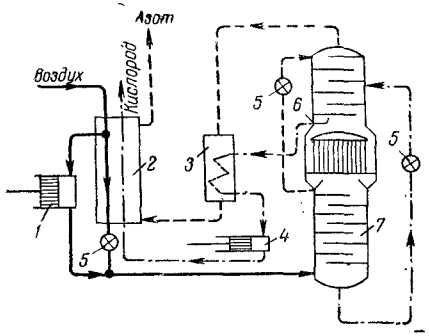



Рис. 4.15. Принципиальная схема установки среднего давления с насосом:

*1* — поршневой детандер; *2* — теплообменник; *3* — переохладитель; *4* — жидкостной насос; *5* — дроссельные вентили; *6* — отбор жидкого кислорода; *7* — ректификационная колонна.

Для получения сжатого кислорода применяется кислородный насос. Принципиальная схема установки среднего давления с насосом дана на рис. 4.15. Уравнение теплового баланса такой установки имеет вид:

$$\Delta i_{\text{др}} + B_{\text{дет}}\Delta i_{\text{дет}} = Ac_p\Delta t_A + Kc_p\Delta t_K + K\left(\frac{1}{427}Lp_K + q_{\text{нас}} + \Delta i^K_{\text{др}}\right) + q_{\text{и}} \qquad (4.3)$$

где $B_{\text{дет}}$ — количество воздуха, поступающего в детандер, *м³/м³* п.в.;
$\Delta i_{\text{дет}}$ — холодопроизводительность (расчетная) детандера, *ккал/м³*.



Остальные обозначения те же, что и в уравнениях (4.1) и (4.2).

Из уравнения (4.3) определяют количество воздуха $B_{\text{дет}}$, поступающего в детандер. Значения *K* и *A* берут из материального баланса. Путем ряда предварительных расчетов находят рабочее давление цикла.

### 4.5.1. Установка КГСН-150

Технологическая схема кислородной установки КГСН-150 среднего давления с кислородным насосом показана на рис. 4.16. Производительность этой установки 150 *м³/ч* кислорода.

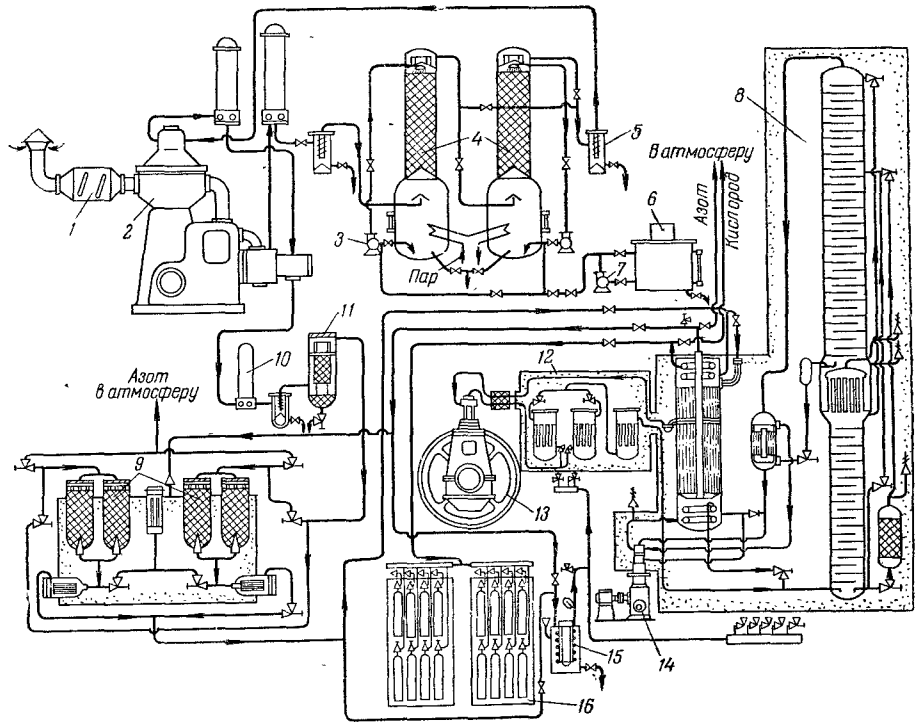



Рис. 4.16. Технологическая схема установки КГСН-150:

*1* — воздушный фильтр; *2* — воздушный компрессор; *3* — щелочной циркуляционный насос; *4* — скруббер; *5* — щелочеотделитель; *6* — бак для растворения едкого натра; *7* — насос для щелочного раствора; *8* — блок разделения воздуха; *9* — блок осушки; *10* — концевой холодильник; *11* — масловлагоотделитель; *12* — блок детандерных фильтров; *13* — поршневой детандер; *14* — насос жидкого кислорода; *15* — подогреватель воздуха; *16* — наполнительная рампа.

Установка КГСН-150 комплектуется угловым воздушным компрессором 205 ВП-16/70 производительностью 960 *м³/ч* с конечным избыточным давлением сжатия 70 *кгс/см²*. Такое давление под-

держивается при запуске установки, находящейся в теплом состоянии. При установившемся процессе избыточное давление воздуха поддерживается равным 50—55 *кгс/см²*. На этой установке получают кислород 99,2—99,5%-ной концентрации и 97%-ный отбросный азот. Удельный расход электроэнергии на 1 *м³* кислорода в баллонах — около 1,4 *квт·ч* (5040 *кдж*).

На базе данной установки выпускалась также азотно-кислородная установка АКГСН-960, предназначенная для одновременного получения 500 *м³/ч* сухого чистого 99,9%-ного азота, 115 *м³/ч* влажного 99%-ного азота и 85 *м³/ч* 99,5%-ного технического кислорода.

Схема установки АКГСН-960 аналогична схеме КГСН-150 и отличается от нее тем, что имеет устройство для отбора «грязной» аргонной фракции из верхней колонны. Холод аргонной фракции рекуперируется сжатым воздухом, поступающим в теплообменник, для чего на нем снаружи расположена дополнительная секция; число тарелок в верхней колонне увеличено до 48. «Грязная» аргонная фракция выбрасывается в атмосферу, так как содержит кислород и поэтому не может использоваться для регенерации адсорбента блока осушки.

На установке АКГСН-960 расходуется 0,8 *квт·ч* (2880 *кдж*) энергии на 1 *м³* кислорода (с учетом наполнения баллонов) и 0,25 *квт·ч* (900 *кдж*) на 1 *м³* азота.

Концентрация получаемого азота и кислорода может быть несколько повышена за счет сокращения отбора указанных продуктов из аппарата и увеличения отбора аргонной фракции.

### 4.5.2. Установка К-0,15

Учитывая современные направления в технике разделения воздуха (применение предварительного азотно-водяного охлаждения воздуха, оснащение установок цеолитовыми блоками для комплексной очистки и осушки воздуха, повышение концентрации получаемого кислорода, применение жидкостных насосов и др.) вместо установки КГСН-150 создана новая установка К-0,15, технологическая схема которой приведена на рис. 4.17. Эта установка предназначена для получения 165 *м³/ч* сухого технического кислорода 99,7%-ной концентрации под давлением до 165 *кгс/см²*. Рабочее давление цикла при пуске 64 *кгс/см²*, при установившемся режиме — 45 *кгс/см²*. На установке К-0,15 можно получать газообразный кислород, сжатый до 130—165 *кгс/см²* и до 20 *кгс/см²* с подачей его непосредственно в сеть потребления, а также жидкий кислород или жидкий азот (см. табл. 4.3). Азотно-водяной холодильник здесь применен для предварительного охлаждения воздуха перед цеолитовым блоком очистки и осушки до температуры, необходимой для нормальной работы блока очистки (8 °С).

Для улучшения процесса ректификации в этой установке применен переохладитель азотной флегмы. Вместо детандера с кольцами, смазываемыми маслом, используется детандер среднего давления, работающий без смазки поршня при температуре впуска —98 °С (175 °К). Вместо компрессора с масляной смазкой цилиндров установка может комплектоваться воздушным компрессором



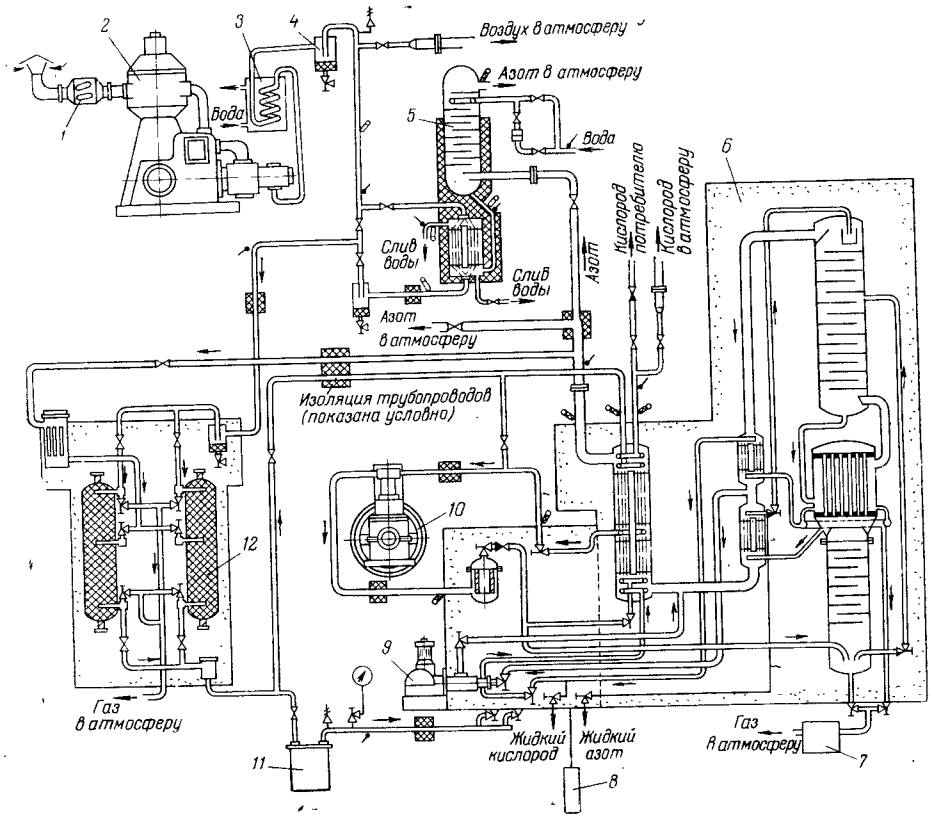



Рис. 4.17. Технологическая схема установки К-0,15:

*1* — воздушный фильтр; *2* — воздушный компрессор; *3* — концевой холодильник; *4* — маслоотделитель; *5* — азотно-водяной холодильник; *6* — блок разделения воздуха; *7* — испаритель жидкого кислорода; *8* — шкаф КИП; *9* — жидкостной насос; *10* — поршневой детандер; *11* — подогреватель воздуха; *12* — блок очистки и осушки воздуха цеолитами.

2С5 ВП-16/70 производительностью 960 *м³/ч*, работающим без масляной смазки цилиндров и сальников. Это повышает взрывобезопасность установки и позволяет отказаться от детандерных фильтров и адсорберов ацетилена.

Схема блока разделения воздуха дана на рис. 4.18. Конструкция блока К-0,15 допускает его установку вне здания цеха.

Для повышения надежности и долговечности все основные аппараты установки изготовляют из нержавеющей стали и меди, применение латуни сведено к минимуму.

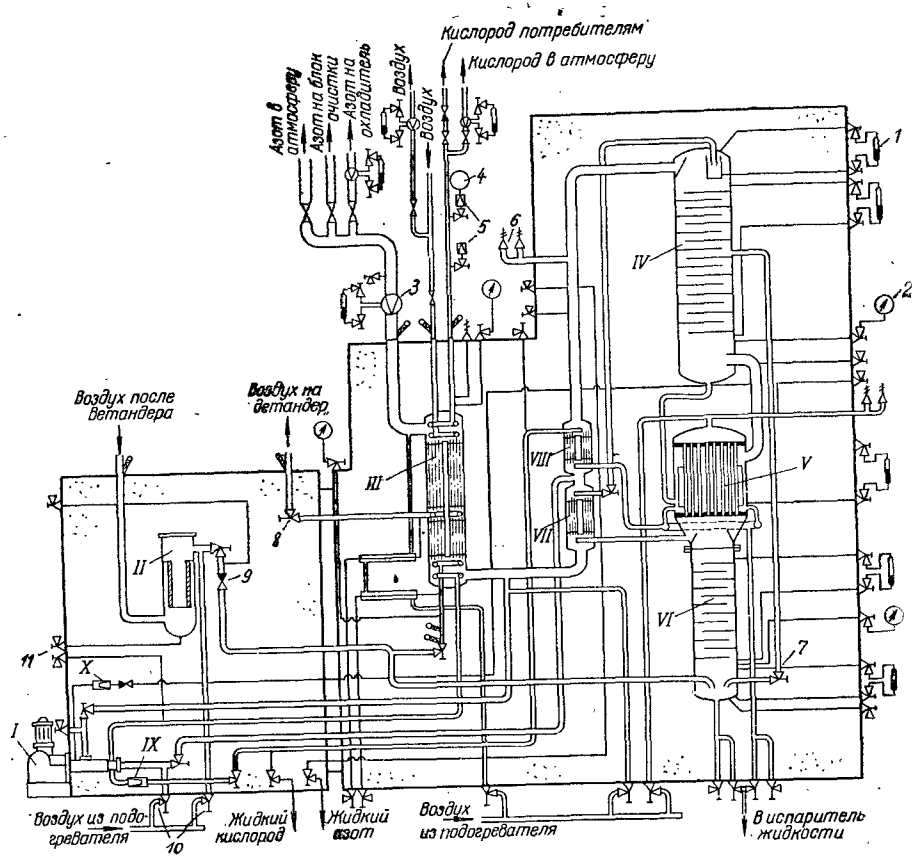



Рис. 4.18. Схема блока разделения воздуха установки К-0,15:

*I* — жидкостной насос; *II* — фильтр; *III* — теплообменник; *IV* — верхняя колонна; *V* — конденсатор; *VI* — нижняя колонна; *VII* — переохладитель азотной флегмы; *VIII* — переохладитель жидкого кислорода; *IX*, *X* — фильтры; *1* — указатели уровней; *2* — манометры; *3* — измерительные диафрагмы; *4* — автоматический газоанализатор типа МН-5130М на 98—100%-ный кислород; *5* — редукторы кислородные; *6* — предохранительные клапаны; *7* — дроссельные вентили; *8* — запорные вентили; *9* — обратные клапаны; *10* — отогревательные вентили; *11* — продувочные вентили.

### 4.5.3. Установка К-0,4

Кроме описанной выше установки К-0,15 современным требованиям отвечает также установка среднего давления К-0,4 с детандером и жидкостными насосами, оснащенная блоком очистки и осушки воздуха цеолитами. Установка рассчитана на получение



99,7%-ного газообразного кислорода в количестве 420 *м³/ч* под давлением 165 и 20 *кгс/см²*. Рабочее давление воздуха перед блоком 50 *кгс/см²*. При работе с давлением 64 *кгс/см²* установка может давать 230 *кг/ч* жидкого кислорода. Количество перерабатываемого воздуха составляет 2400 *м³/ч*. Установка комплектуется воздушным компрессором 4М10-40/70, поршневым детандером ЗаД-11/50, работающим без смазки цилиндра, и двумя жидкостными насосами типа 22НСГ-500/200. Для предварительного охлаждения воздуха перед блоком очистки и осушки применяется азотно-водяной охладитель. Блок разделения воздуха имеет перлитовую изоляцию и приспособлен для размещения вне здания. Удельный расход энергии — около 1 *квт·ч/м³* кислорода. Продолжительность рабочей кампании 100 суток. Продолжительность пуска и отогрева установки составляет 12—15 *ч*.

Модификацией установки К-0,4 является азотно-кислородная установка АК-1,5, укомплектованная воздушным компрессором 4М10-40/70 и детандером ЗаД-18/40, работающим без смазки цилиндров*. Эта установка также имеет блок очистки и осушки воздуха цеолитами. Предварительное охлаждение воздуха перед блоком очистки и осушки производится в теплообменнике отходящим азотом. Блок разделения воздуха имеет перлитовую изоляцию и предназначен для размещения вне здания. Производительность установки АК-1,5 составляет 215 *м³/ч* кислорода 99,7%-ной концентрации и 1500 *м³/ч* азота 99,9995%-ной концентрации (содержит не более 0,0005% $O_2$). Удельный расход энергии 0,22—0,26 *квт·ч/м³* азота.

Аналогичные конструктивные решения реализованы и в новых азотных и азотно-кислородных установках А-0,6 и АК-0,6 (см. табл. 4.5).

## 4.6. УСТАНОВКИ ДВУХ ДАВЛЕНИЙ

По сравнению с установками малой и средней мощности в установках большой производительности холодопотери на 1 *м³* перерабатываемого воздуха меньше, поэтому в них возможно сжимать до высокого давления не весь перерабатываемый воздух, а только часть его. Холодопроизводительность цикла, получаемая при расширении в детандере этой части воздуха, достаточна для компенсации холодопотерь воздухоразделительного аппарата. Удельный расход энергии на получение кислорода значительно уменьшается.

Принципиальная схема установки двух давлений с холодильным циклом высокого давления и поршневым детандером показана на

* Установка АК-1,5 может работать в комплекте с турбодетандером РТ-1,3/40 взамен поршневого детандера ЗаД-18/40. При использовании турбодетандера исключается попадание в блок разделения масла (при его случайном проскоке), снижаются холодопотери, повышается надежность и упрощается эксплуатация.

рис. 4.19. Уравнение теплового баланса такой установки имеет вид:

$$B_{в.д}\Delta i^{в.д}_{др} + B_{н.д}\Delta i^{н.д}_{др} + B_{дет}\Delta i_{дет} = (A_р + K)\, c_р \Delta t_{рег} + A_т \Delta t_т + q_и \qquad (4.4$$

где $B_{в.д}$ и $B_{н.д}$ — доли воздуха высокого и низкого давлений, $м^3/м^3$ п.в.;
$\Delta i^{в.д}_{др}$ и $\Delta i^{н.д}_{др}$ — эффекты дросселирования воздуха высокого и низкого да лений, $ккал/м^3$;
$B_{дет}$ — доля детандерного воздуха, $м^3/м^3$ п.в.;
$\Delta i_{дет}$ — холодопроизводительность детандера, $ккал/м^3$;
$A_р$ и $A_т$ — количество азота, проходящего через регенераторы и т плообменник, $м^3/м^3$ п.в.;
$K$ — количество получаемого кислорода, $м^3/м^3$ п.в.;
$c_р$ — теплоемкость азота и кислорода при 300 °С и 760 *мм рт. ст* $c_р = 0{,}312$ $ккал/(м^3 \cdot град)$;
$\Delta t_{рег}$ — недорекуперация в азотных и кислородных регенератора $\Delta t_{рег} = 5$ *град*;
$\Delta t_т$ — недорекуперация в теплообменнике, $\Delta t_т = 10$ *град*;
$q_и$ — потери в окружающую среду через изоляцию, $q_и$ =1,5 $ккал/м^3$ п.в.

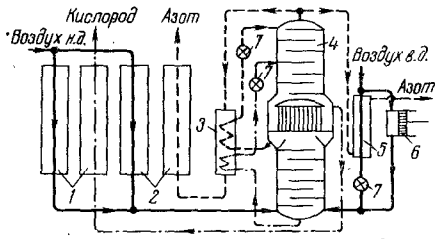



Рис. 4.19. Принципиальная сх установки двух давлений с хо дильным циклом высокого давле и поршневым детандером

*1* — кислородные регенераторы; *2* — а ные регенераторы; *3* — переохлади жидкости; *4* — ректификационная ко на; *5* — теплообменник; *6* — поршн детандер; *7* — дроссельные вентил

### 4.6.1. Установка КГ-300М

Установка КГ-300М (рис. 4.20) предназначена для получе 300 $м^3/ч$ газообразного технического кислорода 99,2—99,5% концентрации. В этой установке используется воздух двух да ний и применяется холодильный цикл высокого давления с де дером.

Охлаждение воздуха низкого давления, очистка его от вл и двуокиси углерода производится в азотных регенераторах п ком отходящего азота. Воздух засасывается через пылеулавли щий фильтр *1* двухступенчатым двойного действия угловым душным компрессором *2* типа 205 ВП-30/8 производительно 1800 $м^3/ч$. При производительности установки 300 $м^3/ч$ кисло в блок разделения поступает 1800 $м^3/ч$ воздуха (при 2 и 760 *мм рт. ст.*), в том числе воздуха низкого давления 1320 и высокого — 480 $м^3/ч$. Избыточное давление воздуха о 6 $кгс/см^2$. Сжатие части воздуха до избыточного давл 90 $кгс/см^2$ (при установившемся процессе) или до 200 *кг* (в период пуска) производится в дожимающем вертикальном



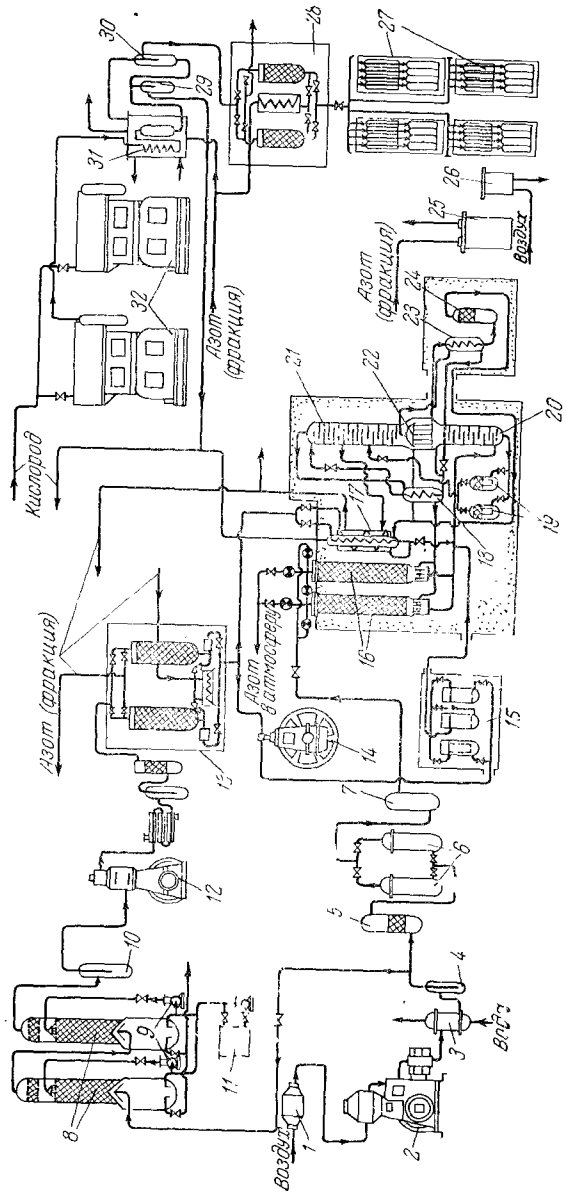



Рис. 4.20. Технологическая схема установки КГ-300М:

*1* — воздушный фильтр; *2*, *12* — воздушные компрессоры; *3* — холодильник; *4*, *5* — масловлагоотделители; *6* — масляные фильтры; *7* — ресивер; *8* — скрубберы; *9* — щелочные насосы; *10* — щелочеотделитель; *11* — бак для приготовления раствора едкого натра; *13* — блок адсорбционной осушки; *14* — поршневой детандер; *15* — детандерные фильтры; *16* — ре генераторы; *17* — теплообменник; *18* — переохладитель; *19* — фильтры-адсорберы; *20* — нижняя ректификационная колонна; *21* — верхняя ректификационная колонна; *22* — основной конденсатор; *23* — выносной конденсатор; *24* — отделитель ацетилена; *25*, *26* — подогреватели; *27* — наполнительные рампы; *28* — блок осушки кислорода; *29*, *30* — влагоотделители; *31* — холодильник; *32* — кислородные компрессоры.

тырехступенчатом двухрядном компрессоре *12* двойного действия типа КД-8/5-220. Из компрессора *2* воздух низкого давления через холодильник *3* и масло-влагоотделитель *4* поступает в дополнительный масло-влагоотделитель *5* и фильтры *6* для очистки от капель ного масла и его паров, а затем через ресивер *7* направляется в азотные регенераторы. После охлаждения в регенераторах воз дух поступает в куб нижней ректификационной колонны *20* блока разделения воздуха.

Регенераторы представляют собой цилиндрические теплообмен ные аппараты, заполненные насадкой в виде дисков, навитых и тонкой алюминиевой ленты. Два азотных регенератора установк работают попеременно. В течение 3 *мин* через один регенерато снизу вверх проходит холодный азот из воздухоразделительно аппарата и охлаждает насадку. Затем поток азота автоматическ переключается на второй регенератор, а через охлажденную н садку первого регенератора сверху вниз проходит воздух низко давления. Спустя 3 *мин* поток холодного азота вновь переключае ся на первый регенератор, а поток охлаждаемого воздуха напра ляется через насадку второго регенератора и т. д. В регенератор воздух очищается также от влаги и двуокиси углерода, котор вымерзают на насадке, а затем при прохождении азота вновь в гоняются и удаляются в атмосферу вместе с отходящим азото Поэтому воздух, прошедший через регенераторы, не нуждает в специальной очистке от двуокиси углерода и осушке.

Другая часть воздуха низкого давления после масло-влаго делителя *4* отводится в скрубберы *8*, насадка которых орошает раствором едкого натра, приготовляемым в баке *11* и перекачив мым насосами *9*. Пройдя щелочеотделитель *10*, воздух, очищен в скрубберах *8* от двуокиси углерода, поступает в дожимающ компрессор *12* и далее — в блок адсорбционной осушки *13* с б лонами, заполненными активным глиноземом.

После блока осушки воздух высокого давления разделяется два потока: примерно $^2/_3$ общего количества воздуха направляе в теплообменник *17*, охлаждается в нем отходящим кислород затем дросселируется в вентиле и под избыточным давлением о ло 5 *кгс/см*$^2$ подается в нижнюю колонну *20* воздухоразделите ного аппарата. Остальная часть воздуха высокого давления правляется в поршневой детандер *14* типа ДВД-70/180. В дета ре воздух расширяется (примерно до 5 *кгс/см*$^2$), при этом охл дается и через маслоулавливающие детандерные фильтры *15* дится в основной поток воздуха низкого давления, который азотных генераторов направляется в куб нижней колонны Обогащенный кислородом воздух подается из куба на сере верхней колонны *21* через кислородный дроссельный вен в котором избыточное давление воздуха снижается до 0,4 *кгс* Предварительно жидкий воздух проходит фильтры и адсорб ацетилена *19*, где удерживаются остатки твердой двуокиси угл да и ацетилен.



Жидкий азот из карманов основного конденсатора *22* подается через азотный дроссельный вентиль для орошения верхней колонны. Азот предварительно проходит переохладитель *18*, где переохлаждается газообразным азотом, идущим из верхней колонны *21* в азотные регенераторы. Вследствие этого уменьшается испарение жидкого азота при дросселировании и увеличивается подача жидкого азота (флегмы) на орошение верхней колонны, т. е. улучшается процесс ректификации. Часть трубок теплообменника *17* используется для нагрева аргонной фракции, отводимой с 30-й тарелки верхней колонны; это улучшает процесс ректификации и облегчает его регулирование.

Схема и внешний вид блока разделения установки КГ-300М приведены на рис. 4.21 (см. Приложение) и 4.22.

**Техническая характеристика установки КГ-300М**

| | |
|---|---|
| Производительность по 99,5%-ному кислороду, *м*$^3$/*ч* | 300/290* |
| Концентрация азота после регенераторов, %, не менее | 97/98* |
| Удельный расход электроэнергии, *квт·ч м*$^3$ кислорода | |
| в газгольдере | 0,9—1,0 |
| в баллонах | 1,2—1,3 |
| Продолжительность | |
| пускового периода, *ч*, не более | 26 |
| рабочей кампании, сутки, не менее | 60 |
| Расход едкого натра на 1 *м*$^3$ кислорода, *г* | 2,5—3 |

* В числителе—при работе без отвода аргонной фракции, в знаменателе—с отводом.

Аргонной фракции (4,5% аргона, 18% кислорода, остальное азот) отводится примерно 75 *м*$^3$/*ч*. Через аргонную секцию теплообменника проходит также часть отходящего азота, которая используется для регенерации активного глинозема в блоке осушки воздуха. Во время пуска установки часть азота отводят через аргонную секцию теплообменника *17*. Этим уменьшается количество кислорода, направляемого в теплообменник *17* (без нарушения в нем процесса теплообмена), что ускоряет наладку процесса ректификации. Все аппараты, работающие при низкой температуре, заключены в теплоизолирующий кожух и образуют блок разделения воздуха.

Кислородные компрессоры снабжены холодильником *31*, влагоотделителями *29* и *30* и блоком осушки кислорода *28*, что дает возможность получать сухой кислород, требующийся для некоторых процессов, например электрометаллургии. В подогревателях *25* и *26* подогревается азот или аргонная фракция, используемые для отогрева узлов блока разделения.

Для предупреждения возможности взрывов в основном конденсаторе *22* блока разделения предусмотрены выносной конденсатор *23* и отделитель ацетилена *24*. Часть азота, не сконденсировавшегося в трубках основного конденсатора *22*, отводится в выносной конденсатор *23*, где сжижается, испаряя жидкий кислород, который самотеком непрерывно сливается из нижней части кон-

денсатора *22*. Получающиеся при этом пары кислорода отводятся через отделитель ацетилена *24* и направляются в теплообменник *17*. Жидкий азот из выносного конденсатора *23* отводится через переохладитель *18* на орошение тарелок верхней колонны.

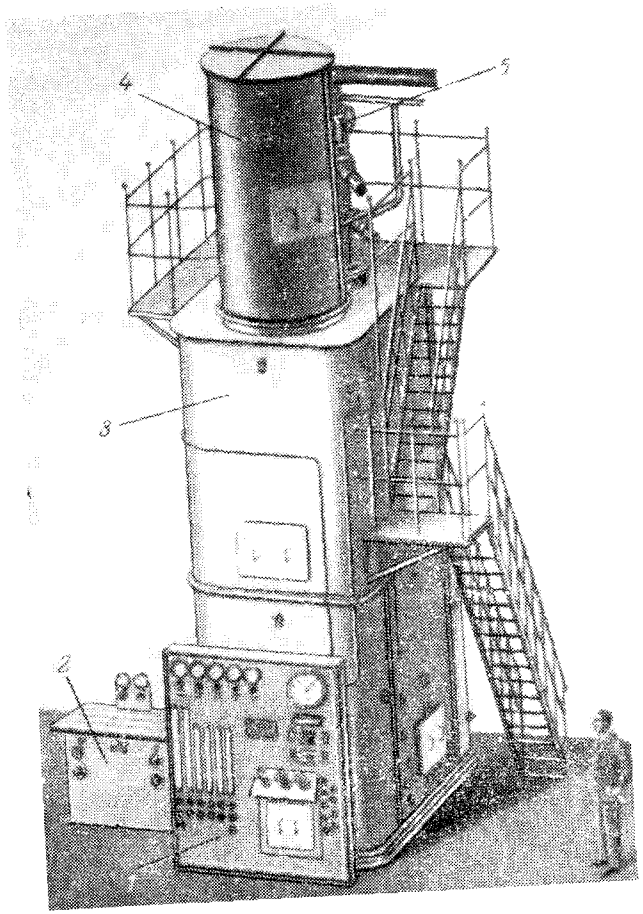



Рис. 4.22. Блок разделения воздуха установки КГ-300М:

*1* — щит управления и контрольно-измерительных приборов; *2* — блок детандерных фильтров; *3* — кожух блока разделения; *4* — верхняя часть верхней колонны; *5* — клапаны принудительного действия азотных регенераторов.

Отвод азота из основного конденсатора в выносной регулируется таким образом, чтобы количество азота в нем было достаточным для испарения всего кислорода, отбираемого из установки. Для этого на линии слива жидкого азота из выносного конденсатора в переохладитель установлен вентиль.



### 4.6.2. Установки КТ-1000 и КТ-1000М

По схеме с циклом двух давлений работает более крупная установка КТ-1000 (рис. 4.23, см. Приложение) производительностью 1000—1200 *м³/ч* газообразного 98,5%-ного кислорода или 950—1000 *м³/ч* кислорода 99,2%-ной концентрации.

Основное количество (4800—6000 *м³/ч*) воздуха проходит фильтр *2*, сжимается в турбокомпрессоре *3* до избыточного давления 4,8—5,2 *кгс/см²*, а затем через концевой холодильник *5* и влагоотделитель *6* подается в регенераторы кислородные *15* и азотные *16*, где охлаждается отходящими из аппарата азотом и кислородом. Регенераторы работают попеременно: через один идет поток сжатого воздуха, а через второй — обратный поток азота или кислорода.

Охлаждаясь в регенераторах, воздух одновременно очищается от влаги и двуокиси углерода, которые в твердом виде оседают на насадке регенераторов. Переключение потока воздуха в регенераторах происходит автоматически через каждые 3 *мин* с помощью клапанов, приводимых в действие сжатым воздухом; воздух поступает в цилиндры клапанов через распределительные (приказные) клапаны механизма переключения. Очищенный в регенераторах и охлажденный до минус 160 — минус 175 °С воздух поступает в нижнюю колонну *21*.

Другая часть воздуха в количестве около 860 *м³/ч* сжимается в поршневом многоступенчатом компрессоре *36* до избыточного давления 125—150 *кгс/см²* (при пуске до 180—200 *кгс/см²*). Этот воздух очищается от $CO_2$ раствором едкого натра в двух скрубберах *11*, включенных между II и III ступенями компрессора и работающих под избыточным давлением 8,5 *кгс/см²*. По выходе из последней ступени компрессора воздух высокого давления подвергается осушке в баллонах блока осушки *28*, заполненных активным глиноземом. Затем сжатый воздух делится на два потока. Около 550 *м³/ч* воздуха проходит через теплообменник *17*, где охлаждается отходящим азотом до минус 125 — минус 130 °С, дросселируется до 5 *кгс/см²* и поступает в нижнюю колонну. Остальная часть воздуха высокого давления (325—350 *м³/ч*, при пуске — до 430 *м³/ч*) направляется в поршневой детандер *25*, где расширяется до избыточного давления 5 *кгс/см²* и при этом охлаждается до минус 125 — минус 130 °С. Эта часть воздуха, пройдя затем маслоулавливающие фильтры *14*, подается также в куб нижней колонны *21*.

В кубе собирается жидкость, содержащая 35—38% кислорода. В верхней части нижней колонны собирается 98%-ный азот, который сжижается в трубках конденсатора *20*. Часть жидкого азота стекает вниз на тарелки нижней колонны, а другая часть собирается в карманах конденсатора. В верхнюю колонну *19* жидкий азот подается через переохладитель *18* и азотный дроссельный вентиль; обогащенная кислородом кубовая жидкость поступает на 24-ю тарелку верхней колонны также через переохладитель *18* и кислород-

ные дроссельные вентили. Кубовая жидкость предварительно проходит керамические фильтры *24* для очистки от твердой двуокиси углерода, а затем — адсорберы *22* для очистки от ацетилена.

Газообразный кислород в качестве готового продукта отводится из конденсатора через кислородные регенераторы *15* в газгольдер *1*. В кислородных регенераторах предусмотрены дополнительные отдувочные клапаны для выброса наружу воздуха, оставшегося в регенераторе от предыдущего периода воздушного дутья. Этим устраняется загрязнение получаемого кислорода азотом, содержащимся в остатке воздуха.

Газообразный 97,5—98%-ный азот из верхней колонны поступает в переохладитель *18*, где охлаждает жидкий азот и кубовую жидкость, подаваемые в верхнюю колонну. После этого азот через теплообменник *17* (частично) и регенераторы *16* выбрасывается в атмосферу. Часть сухого азота, отходящего из теплообменника *17*, подогревается в электроподогревателе *26* и используется для регенерации активного глинозема в блоке осушки *28*.

Для увеличения холодопроизводительности в пусковой период, а также получения части кислорода в жидком состоянии в первых установках КТ-1000 предусматривался турбодетандер *13*. В турбодетандер подавалась часть воздуха, отбираемого после регенераторов, с добавлением в него более теплого воздуха из поршневого детандера под избыточным давлением 5 *кгс/см*² с тем, чтобы воздух перед турбодетандером имел температуру —160 °С. В турбодетандере воздух расширялся до избыточного давления 0,3 *кгс/см*² и в состоянии, близком к насыщению, подавался в воздушную линию азотных регенераторов *16* и теплообменники *17*. При этом продолжительность пускового периода установки составляла около 40 *ч*, а длительность кампании — не менее 100 суток.

При эксплуатации установки КТ-1000 было выявлено, что дополнительная холодопроизводительность турбодетандера используется редко, так как и без этого она запускается достаточно быстро. Поэтому в установках последующих выпусков турбодетандер не ставился. Удельный расход энергии (без учета расхода на вспомогательные нужды и сжатие кислорода) равен 0,62 *квт·ч* (2232 *кдж*) на 1 *м*³ кислорода, а с учетом наполнения баллонов и на вспомогательные нужды — 1,0 *квт·ч* (3600 *кдж*) на 1 *м*³ кислорода.

Модернизированная установка КТ-1000 выпускалась под маркой КТ-1000М. Производительность этой установки равна 1100—1150 *м*³/*ч* кислорода 98,5%-ной концентрации. Удельный расход электроэнергии (без учета затрат на наполнение баллонов) на получение 1 *м*³ кислорода составляет 0,65 *квт·ч* (2340 *кдж*). Для повышения взрывобезопасности блок разделения установки КТ-1000М снабжен дополнительным выносным конденсатором этого типа и отделителем жидкости (рис. 4.24).

Из основного конденсатора в трубки выносного самотеком непрерывно сливается примерно 30—40% жидкого кислорода от общего количества, отбираемого из установки. В межтрубное пространство выносного конденсатора из-под крышки основного поступают пары азота и здесь конденсируются, испаряя весь жидкий кислород, находящийся в трубках выносного конденсатора. Количество отводимого жидкого кислорода регулируется вентилем, установленным на трубе для слива жидкого кислорода из основного конденсатора в выносной. Дросселирование жидкого азота, отводимого из выносного конденсатора, производится вентилем, имеющимся на трубе для подачи жидкого азота из выносного конденсатора в верхнюю колонну. Поскольку кислород отводится



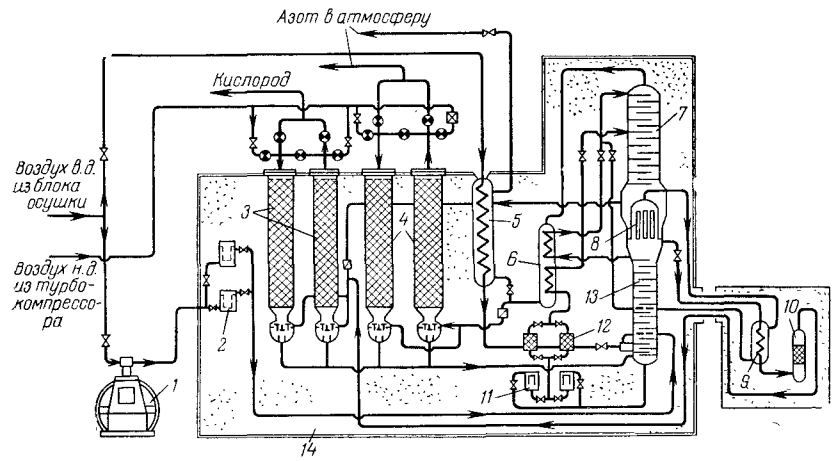



Рис. 4.24. Схема блока разделения воздуха установки КТ-1000М:

*1* — поршневой детандер; *2* — детандерные фильтры; *3* — кислородные регенераторы; *4* — азотные регенераторы; *5* — теплообменник; *6* — переохладитель кубовой жидкости; *7* — верхняя колонна; *8* — основной конденсатор; *9* — выносной конденсатор; *10* — отделитель жидкости; *11* — фильтры для двуокиси углерода; *12* — адсорберы ацетилена; *13* — нижняя колонна; *14* — кожух блока.

в выносной конденсатор из нижней части основного конденсатора, вместе с ним удаляются и содержащиеся в жидком кислороде загрязнения — масло, ацетилен и пр. Испарившийся в выносном конденсаторе кислород, пройдя отделитель жидкости, оставляет в нем загрязняющие примеси и, соединившись с главным потоком кислорода (идущего из основного конденсатора), направляется в кислородные регенераторы.

Загрязнения, которые накапливаются в отделителе, периодически удаляются из него сливом части жидкости. Этим предотвращается накопление в основном конденсаторе ацетилена, погонов масла и других углеводородов, являющихся причиной взрывов в конденсаторах.

## 4.7. УСТАНОВКИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

### 4.7.1. Особенности установок низкого давления

В установках производительностью 3500—4000 *м³/ч* кислорода и более удельные холодопотери снижаются до 1—1,5 *ккал* (4,2—6,3 *кдж*) на 1 *кг* перерабатываемого воздуха. В этом случае становится возможным отказаться от применения в холодильном цикле воздуха высокого давления и для покрытия потерь холода использовать только воздух низкого давления. Рабочее давление цикла в установках низкого давления ($p_и$=5—6 *кгс/см²*) определяется необходимостью создания температурного напора в конденсаторе аппарата двукратной ректификации. Холод в крупных установках низкого давления получается путем расширения части воздуха низкого давления в турбодетандере, обладающем высоким коэффициентом полезного действия. Применяют два турбодетандера; при пуске установки оба работают параллельно, а при установившемся режиме работает один, второй же является резервным.

Работы по созданию крупных кислородных установок для получения технологического кислорода с использованием воздуха одного низкого давления впервые в мировой технике были начаты в СССР в 1939—1943 гг. академиком П. Л. Капицей на основе разработанной им схемы такой установки и конструкции высокоэффективного турбодетандера. В последующие годы эти работы были продолжены научно-исследовательскими институтами и заводами кислородного машиностроения. Установки низкого давления в настоящее время строятся также за рубежом (США, Англия, Франция, Япония, Италия, ФРГ).

Установки низкого давления для получения газообразного технологического кислорода обычно имеют производительность 1300—1400; 3500—6000; 7000—15 000 и 25 000—35 000 *м³/ч* кислорода. Возможны и более крупные установки производительностью порядка 60 000—75 000 *м³/ч* кислорода*.

В установке низкого давления (рис. 4.25) весь воздух, подаваемый турбокомпрессором, пройдя концевой холодильник, поступает под избыточным давлением 5—6 *кгс/см²* в кислородные *1* и азотные *2* регенераторы блока разделения, где охлаждается отходящими кислородом и азотом. Основное количество воздуха после регенераторов поступает в нижнюю колонну. Около 20% воздуха после регенераторов отводится в турбодетандер *4* для получения холода, компенсирующего холодопотери. В турбодетандере воздух

* В Японии фирма «Кобе Стил» строит установки низкого давления и меньшей производительности: на 500 и 1000 *м³/ч* кислорода, перерабатывающие соответственно 3000 и 6000 *м³/ч* воздуха. Эти установки работают при избыточном давлении воздуха 5 *кг/см²*, имеют пластинчатые теплообменники (вместо регенераторов) и комплектуются поршневыми или винтовыми воздушными компрессорами.



расширяется с 5—6 *кгс/см²* до избыточного давления 0,5 *кгс/см²* с производством внешней работы; при этом он охлаждается и подается в верхнюю колонну *5*. Газообразный кислород из конденсатора, а также газообразный азот из колонны *5* отводятся в регенераторы. Затем кислород поступает в газгольдер, а азот выбрасывается в атмосферу.

Для нормальной работы турбодетандера в установках низкого давления поступающий в него воздух должен иметь температуру порядка —156 °С (117 °К), в то время как в регенераторах воздух охлаждается до температуры —172 °С (101 °К), близкой к состоянию насыщения. Для подогревания турбодетандерного воздуха

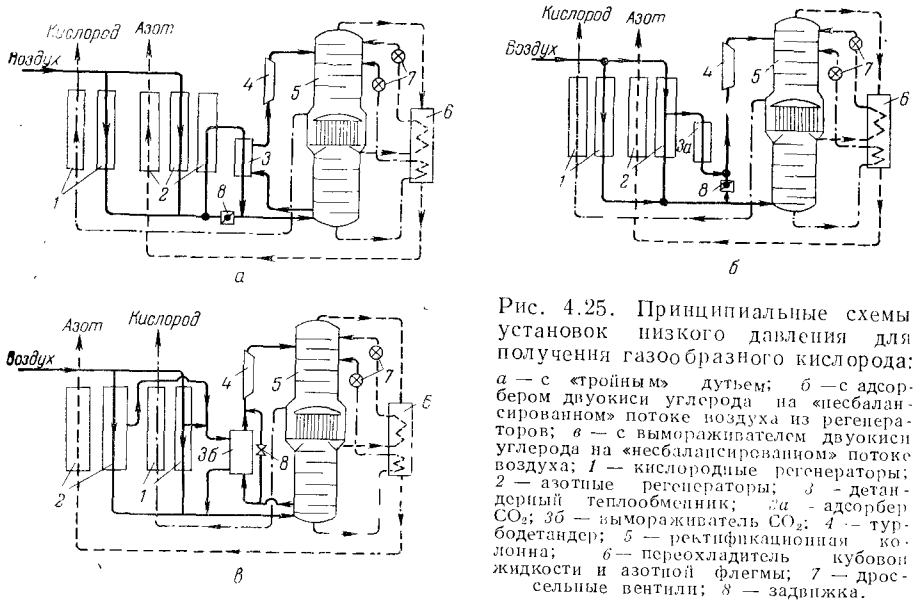



Рис. 4.25. Принципиальные схемы установок низкого давления для получения газообразного кислорода:
*а* — с «тройным» дутьем; *б* — с адсорбером двуокиси углерода на «несбалансированном» потоке воздуха из регенераторов; *в* — с вымораживателем двуокиси углерода на «несбалансированном» потоке воздуха; *1* — кислородные регенераторы; *2* — азотные регенераторы; *3* — детандерный теплообменник; *3а* — адсорбер $CO_2$; *3б* — вымораживатель $CO_2$; *4* — турбодетандер; *5* — ректификационная колонна; *6* — переохладитель кубовой жидкости и азотной флегмы; *7* — дроссельные вентили; *8* — задвижка.

и создания в регенераторах температурных условий, при которых исключается забивка насадки твердой двуокисью углерода (подробнее см. ниже), в установках низкого давления применяют различные способы. Принципиальные схемы установок, в которых использованы некоторые из этих способов, показаны на рис. 4.25.

Для установки низкого давления требуется турбодетандер с высоким коэффициентом полезного действия, так как весь основной холод получается только в нем. Количество холода зависит от давления воздуха на входе в турбодетандер, расхода воздуха через турбодетандер и к. п. д. последнего.

Расход воздуха через турбодетандер определяется условиями процесса ректификации в верхней колонне, зависящего от количества поступающего в колонну детандерного воздуха, так как этим

определяется концентрация отходящего азота, а следовательно, и степень извлечения кислорода из воздуха. С увеличением количества вводимого в колонну детандерного воздуха концентрация азота (и коэффициент извлечения кислорода из воздуха) уменьшается.

Расчетами и опытами установлено, что оптимальные условия создаются при подаче из турбодетандера в верхнюю колонну 20—25% от общего количества воздуха. Для того чтобы при этом можно было компенсировать все холодопотери в установке, турбодетандер должен иметь к. п. д., равный 75—80%.

Удельный расход электроэнергии в установках низкого давления составляет 0,42—0,60 *квт·ч* (1512—2160 *кдж*) на 1 $м^3$ кислорода в зависимости от производительности установки и совершенства ее конструкции.

При проектировании установок с одним низким давлением воздуха необходимо предусмотреть нормальные условия работы регенераторов с тем, чтобы исключить забивку их твердой двуокисью углерода. Для того чтобы осевшая на насадке регенератора (ближе же к его холодному концу, где температура находится в пределах от —130 до —170 °С) твердая $CO_2$ могла сублимироваться и полностью удаляться обратными потоками продуктов разделения, необходимо обеспечить на холодном конце генераторов минимальную разность температур прямого и обратного потоков газов.

Перед началом периода холодного дутья температура насадки на холодном конце генератора приблизительно равна температуре прямого потока воздуха в конце периода теплого дутья. Обратный же поток газов (например, азота) имеет более низкую температуру. Если температура азота значительно ниже температуры насадки, осевшая на насадке $CO_2$ не будет полностью возгоняться и выноситься обратным потоком и постепенно закупорит каналы насадки регенератора.

Чем ближе температура обратного потока газа к температуре насадки, т. е. чем меньше разность температур прямого и обратного потоков газов на холодном конце регенераторов, тем больше $CO_2$ будет выноситься из них обратным потоком газа и тем полнее будет самоочистка насадки регенератора от отложений твердой двуокиси углерода.

При малой разности температур на холодном конце регенераторов тепловая нагрузка в них распределяется более равномерно по всей высоте насадки и количество передаваемого тепла на 1 $м^2$ насадки соответственно уменьшается. Это способствует более равномерному выделению твердой $CO_2$ по высоте регенераторов, уменьшает количество $CO_2$, оседающей на 1 $м^2$ насадки, и облегчает обратный вынос ее потоками азота и кислорода.

Теплоемкость сжатого воздуха прямого потока выше теплоемкости азота (или кислорода) обратного потока. Поэтому при равном количестве газов прямого и обратного потоков разность температур увеличивается по мере приближения к холодному концу регенераторов. Если же потоки неодинаковы, эта разность температур изменяется в зависимости от соотношения количеств газов прямого и обратного потоков.



Теоретически наименьшая разность температур между прямым и обратным потоками газов на холодном конце регенератора должна быть равна 4—5 *град*; практически она может составлять 6—8 *град*. Для уменьшения разности температур на холодном конце и исключения забиваемости регенераторов при их длительной работе применяются следующие способы:

1. Увеличение количества газов обратного потока против количества газов прямого потока в регенераторе. Данный способ используется в установках двух давлений (КГ-300М, КТ-1000М, КТ-3600, КТ-3600Ар, БР-4А), а также в кислородных регенераторах установок низкого давления (например, типа БР-1 и их модификациях).

2. Применение воздушной или азотной тепловой петли (несбалансированного потока). Воздушная тепловая петля по методу «тройного» дутья применяется в установках низкого давления типа БР-1 и их модификациях (Кт-12-2, КтА-12-2, КтК-12-1, КтАр-12, К-11-1 и др.), а также в установках БР-5 и Кт-5-1. Воздушная петля с прохождением петлевого воздуха по змеевикам насадки регенераторов использована в установках БР-14 и КА-5. Азотная тепловая петля применяется в установках БР-9, АКт-17-1 и КА-13,5.

3. Отбор части воздуха из регенераторов при температуре 140—180 °К (когда воздух не содержит влаги и в нем присутствует только двуокись углерода) с последующим удалением из него $CO_2$ путем поглощения силикагелем в адсорберах (установки АКт-16-2, КтА-33, КАр-30) или вымораживания в переключаемых теплообменниках (установки БР-6М, АКт-16-1, БР-2М, КтК-35-2).

В установках двух давлений, например КТ-1000М, часть воздуха прямого потока не поступает в регенераторы и освобождается от $CO_2$ раствором щелочи в скрубберах, а затем направляется на охлаждение в азотные теплообменники. Поскольку дополнительное охлаждение воздуха производится за счет детандера, количество обратного потока азота в теплообменнике можно уменьшить до 60—70% от количества поступающего воздуха. Остальной азот идет через азотные регенераторы, что увеличивает обратный поток на 3—3,5% по сравнению с прямым потоком воздуха.

В кислородных регенераторах обратный поток кислорода также больше на 3—3,5% прямого потока воздуха, что обеспечивается распределением воздуха между кислородными и азотными регенераторами с помощью задвижек на линии воздуха низкого давления. Такое соотношение потоков в регенераторах уменьшает разность температур на холодном конце до 6—8 *град*. В этом случае вся осевшая на насадке двуокись углерода практически полностью выносится обратными потоками газов и регенераторы не забиваются в течение 6—7 месяцев непрерывной работы.

В установках одного низкого давления первый способ применять нецелесообразно, так как очистка части воздуха от $CO_2$ в скрубберах потребовала бы слишком громоздкой очистительной аппаратуры, учитывая низкое давление и связанное с этим прохождение больших объемов воздуха через скруббер. Поэтому в установках низкого давления применяют тепловую петлю по второму или третьему способу.

Тепловую петлю можно осуществить, используя часть потока азота или воздуха. График изменения температуры прямого и обратного потоков по длине регенераторов в случае азотной

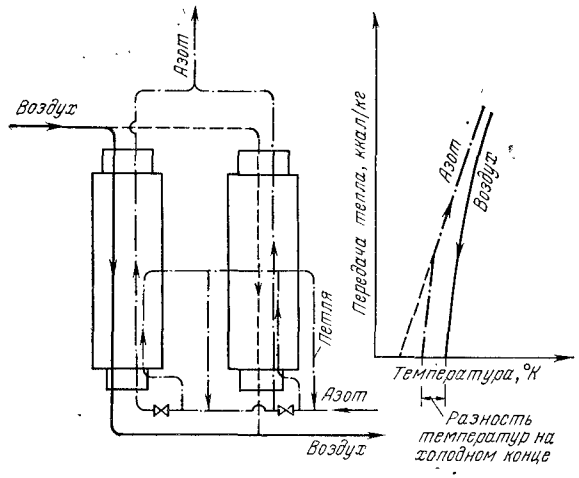



Рис. 4.26. Схема тепловой петли на азотном потоке.

петли в зависимости от количества переданной теплоты показ на рис. 4.26. Часть азота подогревается в регенераторе, после чс вновь примешивается к азоту, поступающему в регенерат В зависимости от температуры подогрева в тепловую петлю отс дится от 12 до 25% азота. Как видно из рис. 4.26, в этом случ повышается температура азота, поступающего в регенерат и уменьшается разность температур воздуха и азота.

По схеме воздушной тепловой петли (рис. 4.27) часть вс духа после холодного конца регенератора вновь направляет в регенератор для дополнительного охлаждения поступающего вс духа прямого потока; этим достигается сближение темпера прямого и обратного потоков на холодном конце регенератора.

Сближение температур воздуха и азота на холодном ко регенераторов достигается также частичным отбором воздуха из мого потока из холодной зоны регенераторов с последующей очи кой этого воздуха от двуокиси углерода в силикагелевых адсор рах или вымораживанием в теплообменниках (способ 3, см. т же рис. 4.25, *б* и 4.25, *в*).



Общее уравнение теплового баланса цикла установки низкого давления для получения газообразного технологического кислорода имеет следующий вид:

$$\Delta i_{\text{др}} + B_{\text{дет}}\Delta i_{\text{дет}} = Kc_p\Delta t_{K.\text{р}} + Ac_p\Delta t_{A.\text{р}} + q_{\text{и}} \qquad (4.5)$$

где $\Delta i_{\text{др}}$ — эффект дросселирования, *ккал/м³* п.в.;
$B_{\text{дет}}$ — доля детандерного воздуха, *м³/м³* п.в.;
$\Delta i_{\text{дет}}$ — фактическая холодопроизводительность турбодетандера, *ккал/м³*;
$K$ — количество кислорода, *м³/м³* п.в.;
$A$ — количество азота, *м³/м³* п.в.;
$c_p$ — теплоемкость кислорода и азота при 1 *кгс/см²* и 300 °К, $c_p = 0{,}312$ *ккал/(м³·град)*;
$\Delta t_{K.\text{р}}$ — недорекуперация в кислородных регенераторах, $\Delta t_{K.\text{р}} = 6$ *град*;
$\Delta t_{A.\text{р}}$ — недорекуперация в азотных регенераторах, $\Delta t_{A.\text{р}} = 4$ *град*;
$q_{\text{и}}$ — потери холода в окружающую среду через изоляцию, *ккал/м³* п.в.

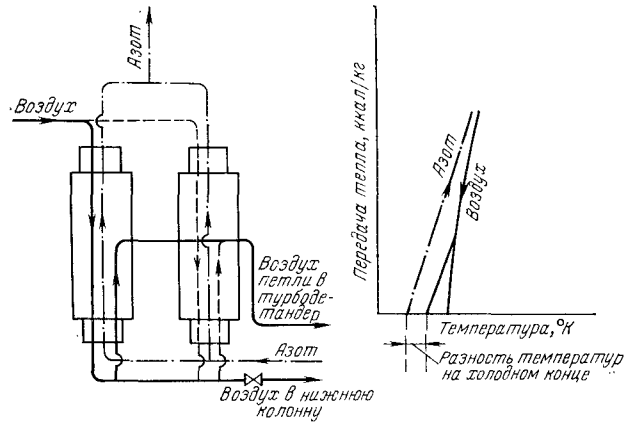



Рис. 4.27. Схема тепловой петли на воздушном потоке.

Если на установке наряду с технологическим кислородом получают также технический кислород под высоким давлением, создаваемым с помощью жидкостного насоса (как, например, в установке БР-1), то уравнение общего теплового баланса цикла будет иметь следующий вид:

$$\Delta i_{\text{др}} + B_{\text{дет}}\Delta i_{\text{дет}} = K_{\text{тех}}c_p\Delta t_{K.\text{р}} + Ac_p\Delta t_{A\ \text{р}} + K_{\text{т}}^{\text{в.д}}\left[c_p^K(\Delta t_{\text{тепл}}^{\text{т}} + \Delta t_{\text{п}}) + \Delta i_K\right] + K_{\text{т}}^{\text{н.д}}c_p\left(\Delta t_{\text{тепл}}^{\text{т}} + \Delta t_{\text{п}}\right) + q_{\text{и}} \qquad (4.6)$$

где $K_{\text{тех}}$ — количество технологического кислорода, выдаваемого при атмосферном давлении, *м³/м³* п.в.;
$K_{\text{т}}^{\text{в.д}}$ — количество технического кислорода, выдаваемого под высоким давлением, *м³/м³* п.в.;

$c_p^K$ = 0,42 *ккал/(м³·град)* — теплоемкость технического кислорода при среднем давлении сжатия 100 *кгс/см²* и 285 °К;

$\Delta t_{тепл}^{т}$ — недорекуперация в теплообменнике технического кислорода (8—10 *град*);

$\Delta t_п$ — разность между температурами воздуха прямого и петлевого потока на теплом конце регенераторов (7 *град*);

$\Delta i_K$ — обратный дроссельный эффект при получении технического сжатого кислорода при помощи жидкостного насоса, $\Delta i_K = i_{300}^{1} - i_{300}^{100} = (111,5-107)\cdot 1,43 = 6,44$ *ккал/м³* $O_2$;

$K_т^{н.д}$ — количество технического кислорода, выходящего из блока при низком (500 *мм вод. ст.*) давлении, *м³/м³* п.в.

Холодопотери, связанные с работой насоса (трение и теплопри ток из окружающей среды), здесь включены в потери холода чере изоляцию $q_и$. Для установки типа БР-1 с блоком криптона и тех нического кислорода, включая потери с жидким криптоновым кон центратом и потери, связанные с работой насоса жидкого кис лорода, $q_и = 1,4$ *ккал/м³* п. в.

### 4.7.2. Установка БР-1 (Кт-12)

В установке БР-1 (рис. 4,28, *а*, см. Приложение) сжатый тур бокомпрессором до избыточного давления 5,2—6,2 *кгс/см²* возду поступает в регенераторы. В два кислородных регенератора *1* на правляется около 20%, а в три азотных *2* — около 80% всего пер рабатываемого воздуха.

В регенераторах воздух охлаждается до состояния, близкок к насыщению ($T_{нас} = 101,5$ °К), и одновременно освобождается с содержащихся в нем влаги и двуокиси углерода. Два кислородн регенератора работают в условиях, при которых обратный пот в них превышает прямой примерно на 3%. При этом средн разность температур на холодном конце регенераторов составля 8,5 *град*, что обеспечивает унос обратным потоком газа, вла и двуокиси углерода, высадившихся на насадке, и охлажден воздуха до состояния сухого насыщенного пара. Переключен кислородных регенераторов производится через каждые 3 *мин*.

В азотных регенераторах уменьшение разности температур холодном конце достигается применением петли по методу «тре ного» дутья, при котором дополнительное охлаждение насад производится потоком холодного (петлевого) воздуха. Для ос ществления такого процесса требуется три азотных регенератор

Газы проходят по регенераторам в следующей последовате. ности (см. рис. 4.28, *б* в Приложении):

1) через регенератор № 2 проходит воздух прямого пото при этом воздух охлаждается, а на холодной насадке из н высаживаются влага и двуокись углерода (I период);

2) через регенератор № 1 проходит азот обратного пото охлаждает насадку и выносит осевшие на ней примеси (II перио



3) через регенератор № 3 в том же направлении проходит воздух петли, дополнительно охлаждает насадку в нижней (холодной) части регенератора и отводится из середины регенератора с температурой 160—180 °К через специальные (петлевые) клапаны (III период). Поскольку насадка уже очищена от $CO_2$ азотом предыдущего периода дутья, петлевой воздух при этом не загрязняется $CO_2$.

Потоки проходят в той же последовательности во всех трех азотных регенераторах. В то время как по одному из регенераторов проходит воздух прямого потока, по другому идет азот, по третьему — петлевой воздух.

Регулированием количества воздуха петлевого потока можно поддерживать среднюю разность температур на холодных концах азотных регенераторов в пределах 5—6 *град*. Переключение азотных регенераторов происходит через каждые 3 *мин*.

После регенератора бо́льшая часть воздуха направляется в нижнюю колонну *16* (см. рис. 4.28, *а* в Приложении); остаток (воздух петли) проходит снизу вверх через соответствующий азотный регенератор. Из середины азотных регенераторов воздух отводится в трубки детандерного теплообменника *8*, где подогревает воздух, идущий в турбодетандер. После этого воздух петли смешивается с воздухом, поступающим из регенераторов в нижнюю колонну.

В нижней колонне *16* происходит предварительное разделение воздуха на жидкий азот и обогащенный кислородом воздух. Часть пара (около 25%) после промывки на трех тарелках отбирается из нижней колонны и через отделитель жидкости *9* поступает в детандерный теплообменник *8*.

Пар, идущий из нижней колонны, нагревается в теплообменнике за счет теплоты петлевого воздуха до 116—117 °К и поступает в один из турбодетандерных агрегатов *7*, где расширяется с абсолютного давления 5,8 до 1,4 *кгс/см²* и при этом охлаждается до температуры насыщения. Для защиты направляющего аппарата и ротора турбодетандера от повреждения перед турбодетандерами установлены сетчатые фильтры *4*, улавливающие из потока воздуха твердые частицы (пыль, крупинки припоя и др.); после турбодетандера охлажденный воздух подается в верхнюю колонну *14* через газовый адсорбер* ацетилена *6*. Обогащенная кислородом кубовая жидкость поступает в один из фильтров *19*, где очищается от частиц твердой двуокиси углерода, и направляется в адсорберы ацетилена *18*.

После адсорберов кубовая жидкость поступает в нижнюю часть переохладителя *15*, где охлаждается до 96 °К, и затем дроссели-

* В течение ряда лет работы блоков разделения воздуха низкого давления установлено отсутствие ацетилена после турбодетандера, так как ацетилен полностью удаляется из детандерного потока воздуха на промывочных тарелках нижней колонны. Поэтому газовые адсорберы после турбодетандера в последующем были из схемы исключены.

руется в распределительный бачок, расположенный во внутренней обечайке верхней колонны; из бачка жидкость сливается на соответствующую тарелку. Конденсация паров азота, поступающего из нижней колонны, происходит в межтрубном пространстве четырех конденсаторов одинаковой конструкции. В трубном пространстве конденсаторов кипит жидкий кислород, поступающий из нижней части верхней колонны.

Отводимый из верхней части верхней колонны газообразный азот подогревается в переохладителе *15* жидкого азота и, пройдя через теплообменник-подогреватель *5*, поступает в регенераторы. В подогревателе *5* азот нагревается до температуры около 95 °К за счет конденсации части паров воздуха, подаваемого из нижней колонны. Сжиженный воздух из подогревателя *5* самотеком сливается в куб нижней колонны.

Повышение температуры азота способствует возгонке и выносу твердой двуокиси углерода из насадки регенераторов. Азот, нагретый в одном из регенераторов до температуры несколько ниже температуры входящего воздуха (разность температур на теплом конце регенераторов 3—5 *град*), выбрасывается в атмосферу.

Газообразный кислород отбирается из дополнительного конденсатора *13* и верхней колонны, а затем через кислородные регенераторы *1* поступает в газгольдер.

Принудительные клапаны *3* петлевого потока воздуха приводятся в действие от распределительного механизма, управляющего работой всех клапанов теплых концов регенераторов.

**Техническая характеристика установки БР-1**

| | |
|---|---|
| Количество перерабатываемого воздуха (при температуре воздуха на входе в блок 30 °С), *м³/ч* | 62 000—63 000 |
| Концентрация, % | |
| технологического кислорода | 95—99 |
| отбросного азота | 99,3—96,5 |
| Максимальное давление воздуха на входе в регенераторы, *кгс/см²* | 6 |
| Производительность, *м³/ч* | |
| кислород | |
| технологический | 12 500* |
| технический при давлении 500 *мм вод. ст.* | До 500 |
| технический при давлении до 165 *кгс/см²* | 75 |
| криптоновый концентрат (с 0,1% криптоно-ксеноновой смеси) | До 70 |

* При указанном количестве перерабатываемого воздуха.

Расход электроэнергии в установке БР-1 на получение 1 *м³* кислорода зависит от производительности установки, определяемой количеством перерабатываемого воздуха (табл. 4.2).

Указанный в табл. 4.2 расход энергии определен для работы без блока криптона и технического кислорода и при изотермическом к. п. д. турбокомпрессора 0,6.



Таблица 4.2. **Режимы работы установки БР-1**

| Производительность по кислороду, *м³/ч* | Концентрация кислорода после регенераторов, % | Количество перерабатываемого воздуха, *м³/ч* | Концентрация азота после регенераторов, % | Избыточное давление, *кгс/см²* | | Удельный расход электроэнергии (на валу турбокомпрессора) на 1 *м³* кислорода, *квт·ч* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | после турбокомпрессора | перед блоком | |
| 10 000 | 97 | 50 000 | 99,1 | 4,85 | 4,65 | 0,41 |
| | 98 | 53 000 | 97,9 | 5,0 | 4,8 | 0,44 |
| | 96 | 62 000 | 99,3 | 5,5 | 5,25 | 0,43 |
| 12 500 | 97 | 63 000 | 99,1 | 5,55 | 5,3 | 0,44 |
| | 98 | 67 000 | 97,9 | 5,75 | 5,5 | 0,47 |
| 15 000 | 96 | 75 000 | 99,2 | 6,2 | 5,8 | 0,45 |

Работа установки при уменьшенном количестве перерабатываемого воздуха не обеспечивает необходимой степени циркуляции жидкости в конденсаторах и способствует накоплению в жидком кислороде взрывоопасных примесей (ацетилена); поэтому таких режимов следует избегать.

Пусковой период основного блока БР-1 равен 70—80 *ч* при среднем расходе воздуха около 40 000 *м³/ч* и избыточном давлении перед блоком 5,8 *кгс/см²*. Продолжительность рабочего периода основного блока БР-1 составляет 9—12 месяцев.

Отогрев аппаратов производится воздухом, отбираемым после регенераторов и нагретым в специальном подогревателе. Блок БР-1 отогревается полностью примерно за 40 *ч* при среднем расходе воздуха около 10 000 *м³/ч*. Избыточное давление воздуха в регенераторах при отогреве должно поддерживаться равным 4,5—5 *кгс/см²*.

Перед пуском блока и периодически не реже одного раза в год адсорберы ацетилена продувают сухим нагретым до 150—200 °С воздухом для удаления влаги из адсорбента (силикагеля). Для этого предусмотрен электроподогреватель мощностью 25 *квт*.

В установке БР-1 использованы два турбодетандера ТДР-19-6 со степенью реактивности 0,51 и мощностью электрогенератора 250 *квт*. Во время пуска блока работают два турбодетандера, в установившемся режиме — один. Средняя нагрузка генератора турбодетандера 185 *квт*.

Для получения технического кислорода и криптонового концентрата (0,1—0,2% Kr+Xe) предусмотрен отдельный блок (см. рис. 4.28, *в*, см. Приложение)*.

Газообразный кислород по трубопроводу *Д* поступает в криптоновую колонну, состоящую из четырех частей. В концентраци-

* На рис. 4.28, *а* и *в* трубопроводы, соединяемые между собой при подключении криптонового блока к основному, обозначены одними и теми же буквами (*Д*, *К*, *З* и т. д.).

онной (верхней) части *2* колонны, расположенной выше ввода газообразного кислорода из основного блока, осуществляется промывка паров кислорода и обогащение флегмы криптоном. В отгонной части *5*, размещенной внизу криптоновой колонны, происходит дальнейшее обогащение флегмы криптоном. Участок *4* между концентрационной и отгонной частями служит для получения технического кислорода. В середине верхней части криптоновой колонны встроена дополнительная колонна *3* технического кислорода, в которой осуществляется отмывка технического кислорода от криптона.

Газообразный кислород, поступающий в криптоновую колонну, поднимается по тарелкам концентрационной части и промывается жидкой флегмой, стекающей из трубок конденсатора *1*, расположенного над концентрационной частью криптоновой колонны. Освобожденный от криптона технологический кислород из колонны направляется в регенераторы основного блока по трубопроводу *Г*. Флегма образуется за счет конденсации кислорода в трубках наружной части конденсатора *1*. Стекающая по тарелкам жидкость обогащается криптоном в верхней *2* и нижней *5* частях колонны. Из нижней части колонны жидкость поступает в трубки конденсатора *7*, где бо́льшая часть ее испаряется. Теплоносителем в конденсаторе *7* является азот, подводимый из нижней колонны основного блока по трубе *Ж*. Смесь жидкость — пар поступает в отделитель жидкости *8*, откуда пар отводится обратно в отгонную часть *5* криптоновой колонны.

Криптоновый концентрат из отделителя *8* выводится в испаритель *6*, после чего для повышения концентрации криптона поступает на дальнейшую переработку в блок обогащения криптона установки УСК, расположенной в отдельном цехе. Газообразный кислород из установки УСК, освобожденный от большей части криптона, возвращается в теплообменник *9*.

Процесс получения технического кислорода следующий.

Технический кислород отмывается от криптона в дополнительной колонне *3* и отводится по трубе через верхнюю часть криптоновой колонны; флегма для отмывки паров технического кислорода от криптона образуется при конденсации небольшой части технического кислорода во внутренних трубках конденсатора *1*. Выйдя из колонны *3*, технический кислород разделяется на два потока: часть поступает в конденсатор-переохладитель *12*, в котором происходит конденсация и переохлаждение кислорода перед подачей его в насос *13*, а затем этот кислород через фильтр *11* и соответствующую секцию теплообменника *9* направляется в баллоны под избыточным давлением до 165 *кгс/см*². Другая часть технического кислорода под избыточным давлением 0,2—0,3 *кгс/см*² поступает во вторую секцию теплообменника *9* и оттуда — в газгольдер технического кислорода. Кислород, просочившийся через сальник насоса *13*, подается в линию технического кислорода через обратный клапан *10*.



Подогрев технического кислорода в теплообменнике *9* производится частью воздуха петлевого потока, поступающего из регенераторов основного блока. Конденсация и переохлаждение паров технического кислорода происходит путем испарения кубовой жидкости, поступающей по трубе *В* из нижней колонны основного блока и дросселируемой до абсолютного давления 1,4 *кгс/см*². Паро-жидкостная смесь кубовой жидкости из конденсатора-переохладителя *12* подается в межтрубное пространство конденсатора *1* криптоновой колонны и используется для ожижения паров

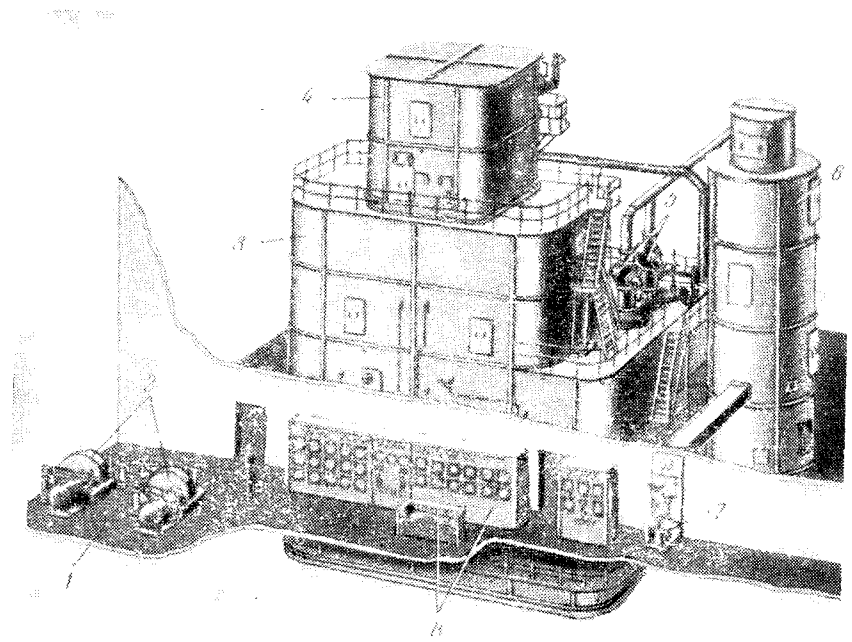


Рис. 4.29. Блок разделения воздуха БР-1:
*1* — площадка обслуживания на 2-м этаже; *2* — турбодетандеры; *3* — основной блок; *4* — верхняя часть верхней колонны; *5* — клапаны принудительного действия; *6* — блок криптона и технического кислорода; *7* — насос жидкого технического кислорода; *8* — щит и пульт управления.

кислорода в трубках конденсатора. Затем пары и кубовая жидкость по трубам *К* и *П* отводятся в верхнюю колонну основного блока. По трубе *З* в основной блок возвращается из конденсатора-испарителя *7* жидкий азот, подаваемый в верхнюю колонну. По трубам *И* и *О* в основной блок отводится петлевой воздух из теплообменника *9* технического кислорода, причем одна часть этого воздуха, поступающая по трубе *И*, направляется в турбодетандер, и вторая часть, поступающая по трубе *О*, дросселируется в верх-

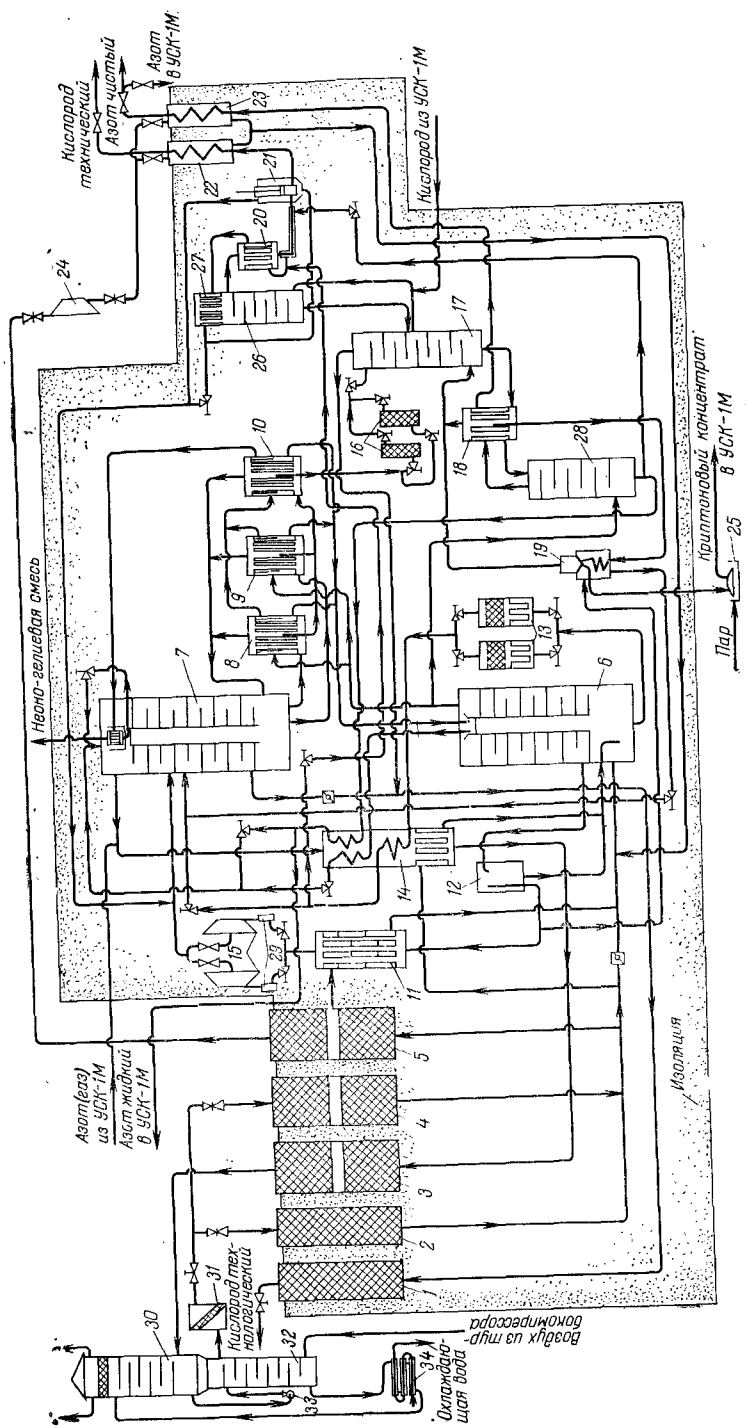



Рис. 4.30. Схема блока разделения воздуха Кт-12-2:

*1, 2* — кислородные регенераторы; *3, 4* и *5* — азотные регенераторы; *6* — нижняя колонна; *7* — верхняя колонна; *8, 9* и *10* — конденсаторы; *11* — детандерный теплообменник; *12* — отделитель жидкости; *13* — фильтры-адсорберы; *14* — переохладитель-подогреватель; *15* — турбодетандеры; *16* — адсорберы для очистки жидкого кислорода от ацетилена; *17* — криптоновая колонна; *18* — нижний конденсатор; *19* — конденсатор-испаритель; *20* — конденсатор-переохладитель; *21* — насос для жидкого кислорода; *22* — кислородный теплообменник; *23* — азотный теплообменник; *24* — воздухоудувка; *25* — испаритель криптонового концентрата; *26* — колонна технического кислорода; *27* — верхний конденсатор; *28* — азотная колонна; *29* — детандерные фильтры; *30* — азотно-водяной скруббер для охлаждения воды; *31* — [illegible]; *32* — [illegible]; *33* — [illegible]; *34* — [illegible]; *35* — насос; *36* — поверхностный подоохладитель.

нюю колонну, соединяясь с основным потоком детандерного воздуха. Общий вид блока разделения воздуха БР-1 приведен на рис. 4.29.

На базе установки БР-1 разработан ряд унифицированных установок, краткие характеристики которых приводятся ниже*.

### 4.7.3. Установка Кт-12-2

Установка (рис. 4.30) снабжена системой предварительного азотно-водяного охлаждения турбокомпрессорного воздуха и предназначена для одновременного получения технологического кислорода, технического кислорода, чистого азота, криптоно-ксенонового концентрата и неоно-гелиевой смеси. В данной установке для повышения взрывобезопасности увеличена проточность аппаратов, в которых возможно накапливание взрывоопасных примесей при выпаривании кислорода. Схема получения криптоно-ксенонового концентрата изменена так, чтобы увеличить проточность конденсатора *10* в результате отмывки криптоно-ксенона из жидкого кислорода в колонне *17*. Увеличена также проточность нижнего конденсатора *18* путем включения в схему витого конденсатора-испарителя *19*. Повышена степень циркуляции кислорода в конденсаторах *8*, *9* и *10*, а также возможность ее регулирования за счет изменения высоты расположения конденсаторов относительно верхней ректификационной колонны. Благодаря этому относительный кажущийся уровень жидкого кислорода в конденсаторах может быть увеличен до 0,6—0,7 высоты трубок.

Из основного конденсатора *10* часть жидкого кислорода по центральной трубе отбирается в адсорбер *16*, затем подается в криптоновую колонну *17* для отмывки от криптоно-ксенона. Испарителем для криптоновой колонны служит нижний конденсатор *18*, в межтрубное пространство которого поступает азот из колонны *28*. Часть жидкого криптоно-ксенонового концентрата отводится из конденсатора *18* по его центральной трубе в змеевик витого конденсатора-испарителя *19*, где почти полностью испаряется за счет теплообмена со сжатым воздухом. Неиспарившийся остаток выводится из блока разделения через теплый испаритель *25* и в качестве «бедного» криптоно-ксенонового концентрата поступает на дальнейшее обогащение в установку УСК-1М. Воздух (конденсат) после конденсатора-испарителя *19* дросселируется в верхнюю колонну.

Чистый азот получается в колонне *28*, в которую для этого отводится небольшое количество газообразного азота из нижней колонны. Флегмой для орошения азотной колонны *28* служит жидкий азот, поступающий из межтрубного пространства конденсатора *18*. Несконденсировавшийся в конденсаторе *18* чистый азот

* Материалы по новым крупным установкам, приведенные в разд. 4.7.3—4.7.15, предоставлены автору В. Д. Никиткиным и Х. Я. Степом.

отводится потребителю через теплообменник *23*, а также частично — в установку УСК-1М.

Технический кислород отбирают из середины криптоновой колонны *17* и отмывают от криптон-ксенона в колонне технического кислорода *26*. Флегмой для этой колонны служит жидкость, образующаяся в трубках конденсатора *27*, в межтрубное пространство которого поступает кубовая жидкость нижней колонны *6*, прошедшая адсорберы *13*, переохладитель *14* и конденсатор-переохладитель *20*. Технический кислород из колонны *26* переохлаждается

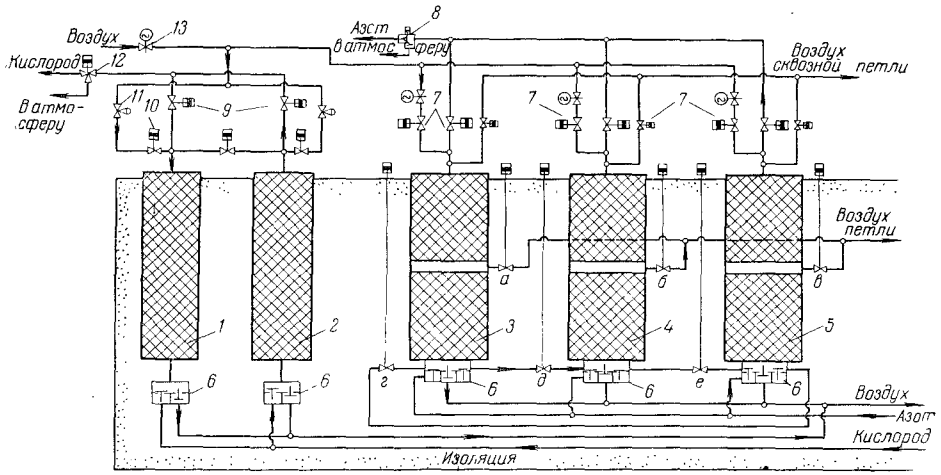



Рис. 4.31. Схема узла регенераторов блока разделения воздуха установки Кт-12-2:

*1, 2* — кислородные регенераторы; *3, 4* и *5* — азотные регенераторы; *6* — автоматические клапаны холодного конца регенераторов; *7* — принудительные клапаны азотных регенераторов; *8* — заслонка трехходовая с пневмоприводом; *9* — принудительные клапаны теплого конца кислородных регенераторов; *10* — запорный клапан с пневмоприводом; *11* — регулирующий клапан с мембранным приводом; *12* — запорный трехходовой клапан с пневмоприводом; *13* — задвижки с электроприводом; *а, б, в* — принудительные клапаны для отбора петлевого воздуха; *г, д, е* — принудительные перепускные клапаны холодного конца азотных регенераторов.

в конденсаторе-переохладителе *20* и кислородным насосом *21* подается в теплообменник *22*, где испаряется, и под давлением (в газообразном виде) поступает в реципиенты, баллоны или к потребителю. В межтрубное пространство теплообменников воздуходувкой *24* подается сухой воздух, отбираемый после регенераторов (воздух сквозной петли).

В мернике с жидким азотом, расположенном в верхней части верхней колонны *7*, установлена трубчатка, служащая концентратором неоно-гелиевой смеси, содержащейся в потоке азота, отбираемого из межтрубного пространства конденсаторов *8*, *9* и *10*. Бо́льшая часть поступающего в трубчатку азота конденсируется и затем дросселируется в мерник верхней колонны, а газообразный



остаток — неоно-гелиевая смесь отводится из верхней части трубчатки для дальнейшей переработки в специальных установках.

Азотные регенераторы (рис. 4.31) снабжены принудительными клапанами *а, б* и *в* в середине регенераторов и такими же клапанами *г, д* и *е* на холодных концах. Это позволяет помимо осуществления работы по схеме «тройного» дутья производить также перепуск холодного воздуха при переключении регенераторов. Например, после окончания периода воздушного дутья прямого потока через регенератор *3* и азотного дутья обратного потока через регенератор *5* открывается на 1—1,5 *сек* клапан *г* и воздух из регенератора *3* перепускается в регенератор *5* до выравнивания давлений, после чего этот клапан закрывается. Затем через регенератор *3* проходит азот, через регенератор *4* — воздух прямого потока, а через регенератор *5* — воздух петли. Этот петлевой воздух поступает из регенератора *4* по клапану *е* и отводится через клапан *в*. В следующий период перепуск воздуха из регенератора *4* в регенератор *3* происходит через клапан *д*, а подача в регенератор *3* и отвод от него петлевого воздуха — соответственно через клапаны *г* и *а* и т. д.

Такая система работы клапанов позволяет на 30% снизить потери сжатого воздуха при переключении регенераторов. Технические данные установки Кт-12-2 приведены в табл. 4.3 (см. ниже).

### 4.7.4. Установка КтА-12-2

По сравнению с установкой Кт-12-2 установка КтА-12-2 значительно производительней по чистому азоту и предназначена для получения до 3000 *м³/ч* чистого азота. Технологическая схема ее подобна схеме установки Кт-12-2, отличаясь лишь увеличенными размерами ректификационной части для получения чистого азота и теплообменников для азота, а также бо́льшей производительностью воздуходувок, установленных на потоке сквозной петли. Техническая характеристика установки дана в табл. 4.5 (см. ниже).

### 4.7.5. Установка КтК-12-1

Установка КтК-12-1 предназначена для получения 3500 *м³/ч* технического кислорода под низким давлением (500 *мм вод. ст.*). От установки Кт-12-2 отличается следующим:

1) увеличено число тарелок в верхней колонне;

2) имеется возможность промежуточного отбора технологического кислорода с 14-й тарелки;

3) технический кислород отводится также со 2-й тарелки верхней колонны, для чего установлен третий теплообменник;

4) увеличена производительность воздуходувок на потоке сквозной петли для обеспечения работы трех теплообменников;

5) кислород из конденсатора *10* (см. рис. 4.30) подается в криптоновую колонну не на верхнюю, а на промежуточную (11-ю) тарелку;

6) орошение верхней части криптоновой колонны производится непосредственно из сборника верхней колонны;

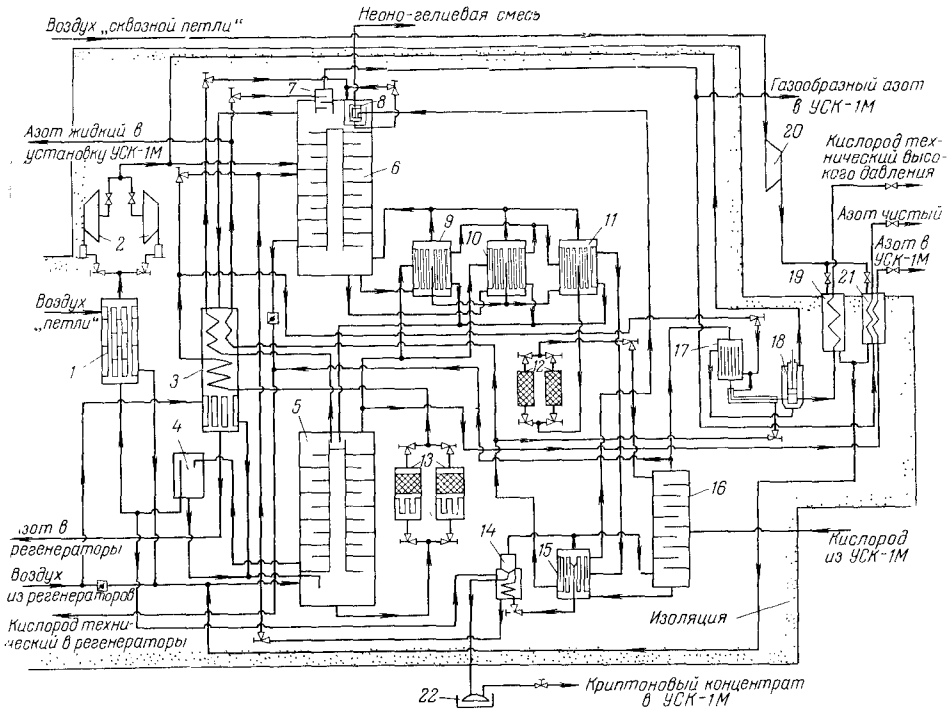



Рис. 4.32. Схема блока разделения воздуха установки К-11-1 (показана без блока регенераторов):

*1* — детандерный теплообменник; *2* — турбодетандеры; *3* — переохладитель-подогреватель; *4* — отделитель жидкости; *5* — нижняя колонна; *6* — верхняя колонна; *7* — дополнительная часть верхней колонны; *8* — концентратор неоно-гелиевой смеси; *9, 10* и *11* — конденсаторы; *12* — адсорберы для очистки жидкого кислорода от ацетилена; *13* — фильтры-адсорберы; *14* — испаритель-конденсатор; *15* — нижний конденсатор; *16* — криптоновая колонна; *17* — конденсатор-переохладитель; *18* — насос для жидкого кислорода; *19* — кислородный теплообменник; *20* — воздуходувка; *21* — азотный теплообменник; *22* — испаритель криптонового концентрата.

7) на потоке жидкого кислорода из сборника верхней колонны *7* в криптоновую колонну установлены *3* ацетиленовых адсорбера, один из которых — резервный, включаемый на период регенерации сорбента в двух основных адсорберах.

Техническая характеристика установки КтК-12-1 приведена в табл. 4.3.



### 4.7.6. Установка К-11-1

Установка К-11-1 предназначена для получения технического кислорода при давлении до 500 *мм вод. ст.*, чистого азота, криптоно-ксенонового концентрата и неоно-гелиевой смеси. Схема блока разделения воздуха установки показана на рис. 4.32. Она подобна схеме Кт-12-2, но имеет некоторые отличия. Например, верхняя колонна имеет увеличенное число тарелок и в верхней части снабжена дополнительной обечайкой с тарелками меньшего диаметра (для получения азота повышенной чистоты), орошаемыми флегмой из нижнего конденсатора *15*. Дополнительная азотная колонна высокого давления отсутствует. Применен двухсекционный азотный теплообменник *21*. Одна из секций теплообменника предназначена для чистого азота низкого давления из дополнительной части *7* верхней колонны *6* и вторая — для азота повышенного давления из нижней колонны *5*, направляемого в установку УСК-1М.

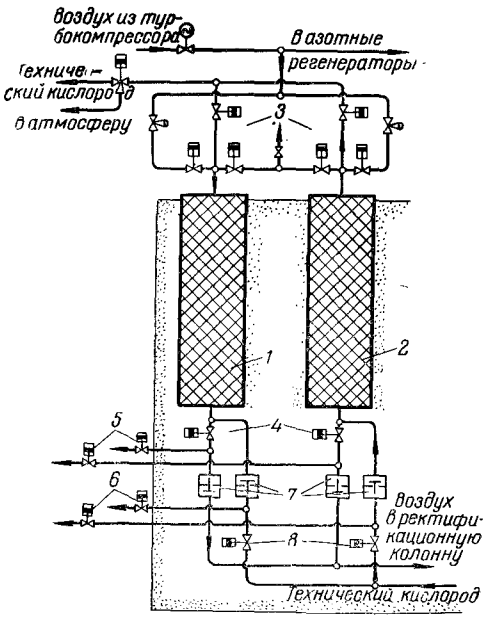



Рис. 4.33. Схема кислородных регенераторов блока разделения воздуха установки К-11-1:

*1, 2* — кислородные регенераторы; *3* — принудительные клапаны теплого конца; *4, 8* — принудительные клапаны запорные; *5, 6* — принудительные клапаны продувочные; *7* — автоматические клапаны холодного конца.

Для предупреждения загрязнения получаемого технического кислорода азотом воздуха на холодных концах кислородных регенераторов установлены отдельные клапанные коробки с автоматическими клапанами *7* (рис. 4.33) для потоков воздуха и кислорода. На линии отводимого в регенераторы чистого кислорода установлены принудительные клапаны *8* диаметром 400 *мм* с пневмоприводом. При прохождении через регенераторы воздуха прямого потока эти клапаны закрыты, а воздух, просочившийся через неплотности автоматических клапанов на линии обратного потока, выбрасывается в атмосферу принудительными пневматическими клапанами *6* диаметром 50 *мм*. При движении через регенераторы обратного потока кислорода пневматические клапаны *4* диаметром 200 *мм* на линии прямого потока воздуха закрыты. Воздух, прошедший через неплотности автоматических клапа-

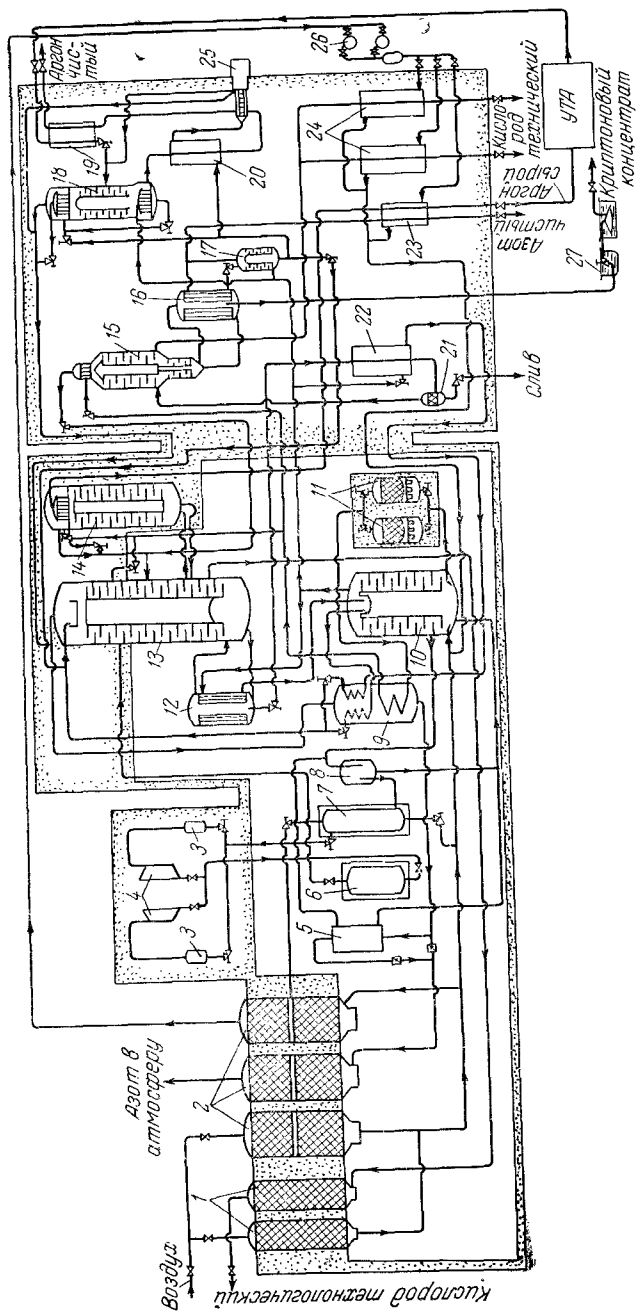



Рис. 4.34. Технологическая схема установки КтКАр-12 (БР-1КАр):

*1* — кислородные регенераторы; *2* — азотные регенераторы; *3* — фильтры турбодетандеров; *4* — турбодетандерные агрегаты; *5* — теплообменник-подогреватель азота; *6* — газовый адсорбер; *7* — детандерный теплообменник; *8* — отделитель жидкости; *9* — переохладитель жидкого азота и кубовой жидкости; *10* — нижняя ректификационная колонна; *11* — фильтры-адсорберы; *12* — конденсатор; *13* — верхняя ректификационная колонна; *14* — колонна с конденсатором для получения сырого аргона; *15* — криптоновая колонна; *16* — конденсатор нижней криптоновой колонны; *17* — азотная колонна; *18* — колонна для получения чистого аргона; *19* — теплообменник-испаритель; *20* — [illegible]; *21* — отделитель ацетилена; *22* — выносной конденсатор; *23* — азотный теплообменник; *24* — кислородный [illegible]; *25* — [illegible]; *26* — [illegible]; *27* — испаритель криптонового концентрата.

нов на прямом потоке, выбрасывается в атмосферу через клапаны *5* диаметром 50 *мм* с пневмоприводом.

Технические данные установки К-11-1 приведены в табл. 4.3.

### 4.7.7. Установка КтКАр-12 (БР-1КАр)

Установка КтКАр-12 (БР-1КАр) предназначена для получения наряду с технологическим и техническим кислородом также аргона. На этой установке (рис. 4.34) сырой аргон получают ректификацией в аргонной колонне фракции, отбираемой из верхней колонны (количество тарелок в верхней колонне соответственно увеличено). Сырой аргон очищается от кислорода в установке УТА. В этой установке кислород каталитически соединяется с водородом, образуя пары воды. После выхода из установки УТА аргон подвергается очистке от азота в специальной колонне, предусмотренной для этого в блоке разделения.

Технические данные установки КтКАр-12 приведены в табл. 4.3.

### 4.7.8. Установка Кт-5-2

Установка Кт-5-2 (рис. 4.35) предназначена для получения технологического кислорода, технического кислорода, чистого азота и криптоно-ксенонового концентрата. Она работает по схеме регенераторов с «тройным» дутьем. Петлевой поток воздуха отводится из середины азотного регенератора при 160—180 °К (минус 113 — минус 93 °С). Переключение азотных и кислородных регенераторов производится через каждые 3 *мин*.

В установке Кт-5-2 используются фильтры из пористого металла с общей поверхностью фильтрации около 8 $м^2$. Для поглощения ацетилена в адсорберах применяется мелкопористый силикагель, высота слоя адсорбента 0,5 *м*. Воздух из турбодетандера вводится в верхнюю колонну между 17-й и 18-й тарелками. Верхняя колонна имеет 36 тарелок. Жидкий кислород из сборника верхней колонны поступает в конденсаторы *12* и *13*. Газообразный кислород из этих конденсаторов возвращается в верхнюю колонну, а жидкий кислород через центральные сливные трубы сливается в выносной конденсатор *14*. Испаряемый в конденсаторе *14* кислород подвергается очистке от ацетилена и других углеводородов в переключаемых адсорберах *15*, куда он подается с помощью парлифта *16*, включенного в циркуляционный контур очистки продукционного кислорода. Часть кислорода в кислородные регенераторы отбирается также из сборника верхней колонны. При получении криптоно-ксенонового концентрата технологический кислород перед поступлением в кислородные регенераторы отмывается от криптоно-ксенона в криптоновой колонне *18*, работающей так же, как и колонна в установке БР-1, описанной выше (см. разд. 4.7.2).

Технический кислород получается в колонне с 14-ю тарелками, расположенной в верхней половине нижней части криптоновой

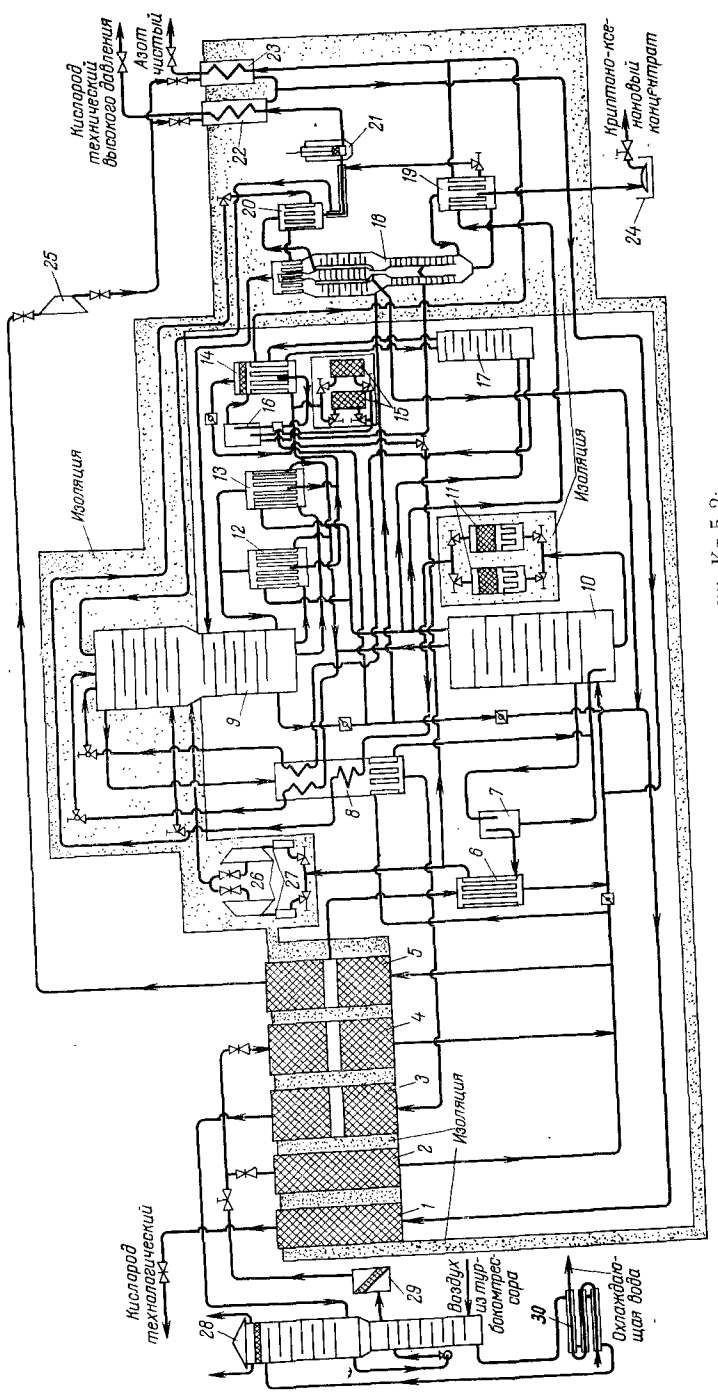



Рис. 4.35. Схема установки Кт-5-2:

*1, 2* — кислородные регенераторы; *3, 4* и *5* — азотные регенераторы; *6* — детандерный теплообменник; *7* — отделитель жидкости; *8* — переохладитель-конденсатор; *9* — верхняя колонна; *10* — нижняя колонна; *11* — фильтры-адсорберы; *12, 13* — конденсаторы, левый и правый; *14* — выносной конденсатор; *15* — адсорберы для очистки жидкого кислорода от ацетилена; *16* — паралифт; *17* — азотная колонна; *18* — криптоновая колонна; *19* — нижний конденсатор; *20* — конденсатор-переохладитель; *21* — насос для жидкого кислорода; *22* — кислородный теплообменник; *23* — азотный теплообменник; *24* — испаритель криптонового концентрата; *25* — воздуходувка; *26* — турбодетандеры; *27* — детандерные фильтры; *28* — скруббер азотно-водяного охлаждения; *29* — влагоотделитель; *30* — поверхностный водоохладитель.

колонны. Криптон и ксенон отмываются из технического кислорода в небольшой колонне, встроенной в основную криптоновую колонну. Чистый азот получается в азотной колонне *17* дополнительной ректификацией азота, отбираемого из нижней колонны основного блока.

Блок разделения воздуха имеет двустенный кожух. Для повышения герметичности кожуха и предотвращения попадания влаги в изоляцию стыки щитов кожуха заклеиваются изнутри тканью и закрашиваются. Также герметизируются и места выхода из кожуха арматуры и коммуникационных труб.

Регенераторы установки Кт-5-2 имеют насадку из дисков алюминиевой ленты толщиной 0,46 *мм* и высотой 50 *мм*. В ленте сделаны две продольные прорези длиной 60 *мм* с шагом 90 *мм* для уменьшения влияния теплопроводности металла насадки и повышения ее способности задерживать двуокись углерода. Общая высота насадки около 4 *м*, диаметр насадки азотного регенератора 1,6 *м*, кислородного — 0,9 *м*. Крышки и нажимные фланцы регенераторов изготовлены из низкоуглеродистой стали. Рабочее давление $p_{изб}=6{,}5$ *кгс/см*$^2$. Вся аппаратура и внутриблочные трубопроводы изготовлены из нержавеющей стали марок Х18Н9Т, Х18Н10Т и Х14Г14Н3Т. Латунь не применяется ввиду возможности ее растрескивания. Технические данные установки Кт-5-2 даны в табл. 4.3.

### 4.7.9. Установка К-1,4(БР-14)

Установка низкого давления К-1,4 (БР-14) предназначена для получения 1400 *м*$^3$*/ч* технического кислорода 99,5%-ной концентрации. Кислород, получаемый на этой установке, не содержит двуокиси углерода и влаги. Для сжатия воздуха используется турбокомпрессор ЦК 135/8 производительностью 8900 *м*$^3$*/ч*, рассчитанный на конечное абсолютное давление сжатия 8 *кгс/см*$^2$. Установка К-1,4 предназначена для использования на предприятиях, потребляющих относительно небольшие количества кислорода для интенсификации технологических процессов, а также на районных кислородных заводах, выпускающих товарный технический кислород.

Сжатый воздух после турбокомпрессора проходит через воздушно-водяной скруббер *1* (рис. 4.36) системы азотно-водяного охлаждения и через влагоотделитель *3* поступает в регенераторы с каменной (базальтовой) насадкой. Вода в скруббер *1* подается насосом после дополнительного охлаждения в азотно-водяном скруббере *2*.

В установке имеются четыре регенератора *4, 5, 6, 7*; воздух одновременно проходит через насадку двух регенераторов. Переключение каждой пары регенераторов сдвинуто на полпериода дутья, т. е. на 4,5 *мин*, так как полный период дутья длится 9 *мин*. Регенераторы работают в следующем порядке. Вначале по двум

регенераторам проходит воздух, а по двум другим — азот. Через 4,5 *мин* один из регенераторов, по которому проходил воздух, переключается с регенератором, по которому шел азот. Еще через 4,5 *мин* происходит переключение второго регенератора, пропускавшего воздух, с регенератором, по которому шел азот. Спустя 4,5 *мин* вновь переключается первая пара регенераторов и т. д.

В насадке регенераторов проложены два змеевика: один для кислорода и один для воздуха тепловой петли. Через змеевики кислород и воздух проходят постоянно в одном направлении независимо от переключения регенераторов.

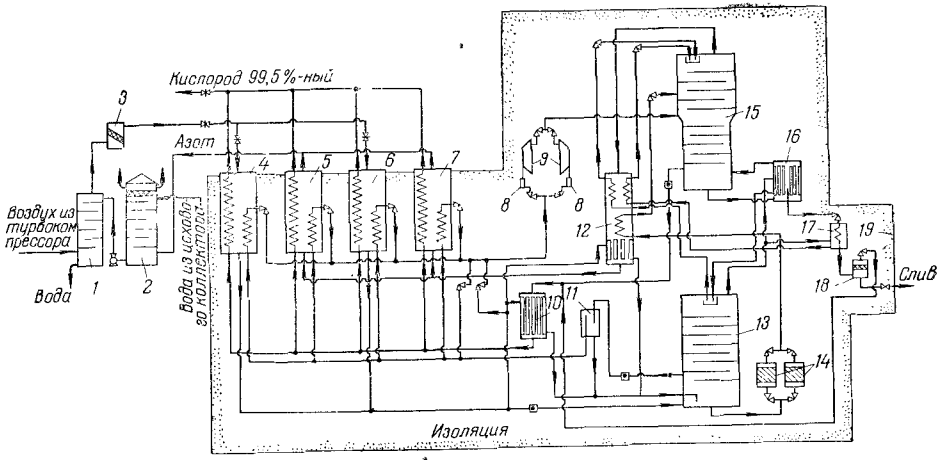



Рис. 4.36. Схема установки К-1,4 (БР-14):

*1* — воздушно-водяной скруббер; *2* — азотно-водяной скруббер; *3* — влагоотделитель; *4, 5, 6* и *7* — регенераторы; *8* — детандерные фильтры; *9* — турбодетандеры; *10* — подогреватель кислорода; *11* — отделитель жидкости; *12* — переохладитель-подогреватель; *13* — нижняя колонна; *14* — адсорберы ацетилена; *15* — верхняя колонна; *16* — основной конденсатор; *17* — выносной конденсатор; *18* — отделитель жидкости; *19* — кожух.

В качестве петлевого потока используется часть воздуха, направляемого в турбодетандеры. В змеевиках этот воздух подогревается и примешивается к потоку воздуха, подаваемого в турбодетандер.

За счет подогрева нижней части насадки регенераторов петлевым потоком воздуха разность температур прямого и обратного потоков на холодном конце регенераторов уменьшается, что исключает забивку их твердой $CO_2$.

Воздух, проходящий по насадке регенераторов, очищается от влаги и двуокиси углерода (вымерзающих на насадке и змеевиках) и охлаждается до температуры сухого насыщенного пара при данном давлении. Затем воздух поступает в куб нижней колонны *13* блока разделения. Основная часть (около 70%) воздуха, поступившего в колонну, подвергается в ней ректификации,



образуя азотную флегму и кубовую жидкость. Часть газообразного азота из пространства над верхней тарелкой отводится в выносной конденсатор *17*, где сжижается, и через переохладитель *12* дросселируется на орошение тарелок верхней колонны. Через этот же переохладитель и второй дроссельный вентиль в верхнюю колонну поступает жидкая азотная флегма из карманов нижней колонны.

Другая часть воздуха (около 30%) из нижней колонны отбирается через отделитель жидкости *11* (после предварительной промывки жидким воздухом от твердой двуокиси углерода на нескольких нижних тарелках) и направляется тремя потоками: один поток (около 17%) проходит через змеевики регенераторов и соединяется со вторым потоком (около 12%), направляясь в один из турбодетандеров *9*, откуда идет в верхнюю колонну *15* Третий поток воздуха (около 1%) после отделителя *11* направляется в переохладитель-подогреватель *12* и подогреватель кислорода *10*, где конденсируется, и снова поступает в куб нижней колонны. Кубовая жидкость из нижней колонны проходит адсорберы *14* и переохладитель-подогреватель *12*, а затем дросселируется на соответствующую тарелку верхней колонны. Отходящий из верхней колонны азот через переохладитель-подогреватель *12* направляется в регенераторы и, пройдя насадку скруббера *2* водяного охлаждения, выбрасывается в атмосферу.

Из основного конденсатора *16* кислород 99,5%-ной концентрации отбирается в газообразном (около 50%) и жидком (около 50%) состоянии. Жидкий кислород направляется в выносной конденсатор *17*, где испаряется за счет теплоты конденсации азота, проходит отделитель жидкости *18* и, смешиваясь с потоком газообразного кислорода, отбираемого из верхней колонны *15*, поступает в подогреватель *10*, а затем направляется в змеевики регенераторов и далее в газгольдер.

Установка К-1,4 работает при избыточном давлении воздуха после турбокомпрессора 5,4 *кгс/см*$^2$; удельный расход энергии 0,67 *квт·ч/м*$^3$ кислорода. Давление газообразного кислорода после регенераторов 500 *мм вод. ст.* Низкотемпературная аппаратура установки изготовляется из алюминиевых сплавов.

Материально-тепловой баланс установки К-1,4 (БР-14) и ее регенераторов приведен в гл. 3 (см. пример 17).

Техническая характеристика установки К-1,4 дана в табл. 4.3.

### 4.7.10 Установка АКт-16-2

На многих химических заводах потребляются большие количества чистого азота и технологического кислорода. На этих предприятиях применяются установки АКт-16-2, заменяющие установки БР-6, БР-6М и АКт-16-1. Установка АКт-16-2 предназначена для получения чистого азота, технологического кислорода, технического кислорода и неоно-гелиевой смеси.

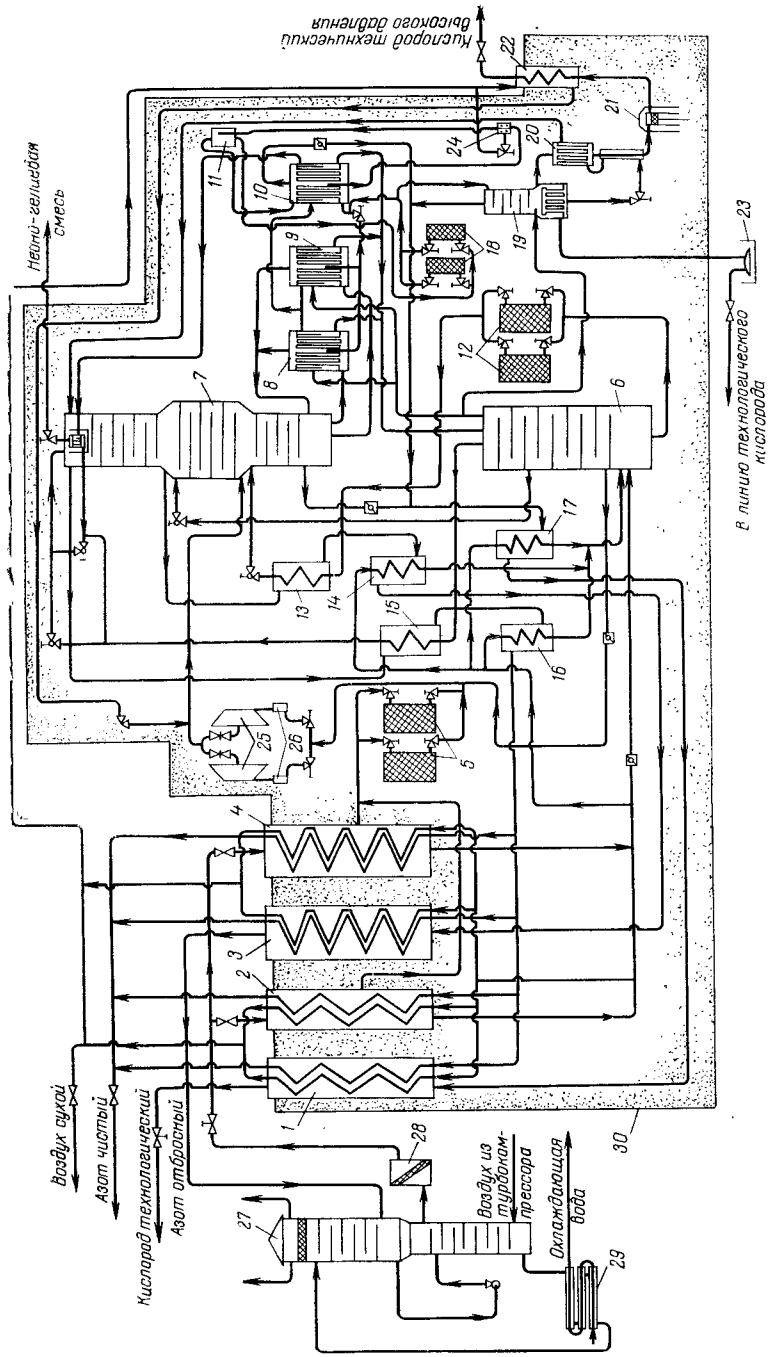



Рис. 4.37. Схема установки АКт-16-2:

*1,2* — кислородные регенераторы; *3,4* — азотные регенераторы; *5* — адсорберы для очистки петлевого воздуха от $CO_2$; *6* — нижняя колонна; *7* — верхняя колонна; *8,9* — основные конденсаторы; *10* — выносной конденсатор; *11* — отделитель пара; *12* — адсорберы кубовой жидкости; *13* — переохладитель кубовой жидкости; *14* — подогреватель отбросного азота; *15* — переохладитель азотной флегмы; *16* — подогреватель чистого азота; *17* — подогреватель технологического кислорода; *18* — адсорберы для очистки жидкого кислорода от ацетилена; *19* — колонна технического кислорода; *20* — переохладитель жидкого технического кислорода; *21* — насос для [illegible]; *22* — кислородный теплообменник; *23* — испаритель; *24* — форсунка парлифта; *25* — турбодетандеры; *26* — детан- [illegible] воздух



Сжатый в турбокомпрессоре воздух проходит скруббер азотно-водяного охлаждения *27* (рис. 4.37), влагоотделитель *28* и направляется в кислородные *1*, *2* и азотные *3*, *4* регенераторы, заполненные каменной (базальтовой) насадкой с частицами размером 4—8 *мм* (90—95%) и 2—4 *мм* (5—10%). Через змеевики, расположенные внутри насадки, отводятся чистый азот и сухой воздух из блока разделения. Технологический кислород и отбросный азот выводятся из блока через насадку регенераторов, обтекая снаружи трубки змеевиков.

Переключение потоков в соответствующей паре регенераторов происходит через каждые 9—15 *мин*. Влага и двуокись углерода вымерзают на каменной насадке и наружных поверхностях змеевиков регенераторов, а затем выносятся потоками отбросного азота и технологического кислорода. Основная часть воздуха, охлажденного в регенераторах до —173 °С, поступает в куб нижней колонны *6*, имеющей 36 тарелок. Меньшая часть воздуха (небалансирующийся поток) общим количеством около 4300 $м^3/ч$ отбирается через принудительные клапаны из середины азотного и кислородного регенераторов и при абсолютном давлении 6 $кгс/см^2$ и температуре —125 °С (когда воздух не содержит влаги) направляется в один из переключаемых адсорберов *5* для очистки от двуокиси углерода и углеводородов.

После адсорбера петлевой воздух примешивается к потоку воздуха, отбираемого после трех промывочных тарелок нижней колонны *6*, и направляется на расширение в турбодетандер *25*. Общее количество воздуха, поступающего в турбодетандер, составляет 14155 $м^3/ч$, избыточное давление — 4,73 $кгс/см^2$, температура — минус 146,2 °С, избыточное давление после турбодетандера — 0,4 $кгс/см^2$. Один турбодетандер рабочий, второй резервный и используется при пуске.

Из турбодетандера расширившийся и охлажденный до —182 °С воздух вводится в среднюю, расширенную часть верхней ректификационной колонны *7* на 14-ю тарелку. Общее число тарелок в верхней колонне 58 шт.

Средняя часть верхней колонны орошается кубовой жидкостью (содержащей 39% $O_2$), поступающей из нижней колонны через адсорберы *12* и переохладитель *13* на 17-ю тарелку. Из середины нижней колонны (с 14-й тарелки) отбирается грязная азотная флегма, содержащая 5% кислорода, которая через дроссельный вентиль подается на 30-ю тарелку верхней колонны, т. е. выше места ввода кубовой жидкости. Дальнейшая очистка азота от примеси кислорода происходит уже в верхней части верхней колонны *7*, для которой флегмой служит жидкий чистый азот, отбираемый из верхнего сборника нижней колонны через переохладитель *15*.

Жидкий технологический кислород накапливается внизу верхней колонны (сборнике) и оттуда поступает в трубки двух основных конденсаторов *8* и *9*, где испаряется конденсирующимся в меж-

трубном пространстве азотом, который поступает в это пространство в газообразном виде из нижней колонны. Жидкий азот из конденсаторов стекает в верхний сборник нижней колонны и частично используется для орошения ее тарелок.

Испарившийся в конденсаторах *8* и *9* кислород направляется в верхнюю колонну. Продукционная часть кислорода перепускается из конденсаторов *8* и *9* в выносной конденсатор *10*. Из конденсатора *10* жидкий кислород поступает в очищающий контур с двумя переключаемыми силикагелевыми адсорберами *18*, где очищается от ацетилена и других углеводородов. Для многократной циркуляции жидкого кислорода в очистном контуре в форсунку *24* непрерывно подается сухой воздух, обеспечивающий работу парлифта. Продукционный газообразный кислород из выносного конденсатора *10* отводится в поток технологического кислорода, отбираемого из газового пространства сборника верхней колонны, смешивается с ним и через подогреватель *17* поступает в насадку кислородных регенераторов, пройдя которые, направляется потребителю.

Пары азота из конденсаторов направляются в концентратор (трубчатку) неоно-гелиевой смеси, расположенный в мернике верхней колонны, где большая часть их конденсируется и затем дросселируется в верхнюю колонну. Несконденсированная часть, представляющая собой азото-неоно-гелиевую смесь, отводится из трубчатки для дальнейшего обогащения и переработки в специальных установках.

Часть жидкого кислорода (около 600 *м³/ч*) отбирается из циркуляционного контура конденсатора *10* и направляется на орошение колонны *19* технического кислорода, где отмывается от азота. Далее, при достижении 99,9%-ной концентрации, кислород в жидком виде через переохладитель *20* поступает в жидкостной насос *21*, которым подается в трубки теплообменника *22*. В теплообменнике кислород испаряется сухим воздухом, проходящим по межтрубному пространству, и под давлением до 165 *кгс/см²* выдается потребителям в качестве технического кислорода. В трубки испарителя колонны *19* подается чистый азот из колонны *6*, который затем дросселируется, проходит рубашку насоса и межтрубное пространство переохладителя *20*, после чего направляется на орошение верхней колонны. Газообразный кислород из верхней части колонны *19* отводится в линию технологического кислорода, направляемого в регенераторы.

В межтрубное пространство переохладителя *13* поступает отбросный азот, а переохладителя *15* — чистый азот из верхней колонны *7*. Для уменьшения разности температур на холодных концах регенераторов обратные потоки отбросного азота, чистого азота и технологического кислорода дополнительно подогреваются в подогревателях *14*, *16* и *17* сжатым воздухом, который частично конденсируется в трубках этих подогревателей и затем подается в куб нижней колонны.



До освоения установки АКт-16-2 выпускались аналогичные по характеристике установки АКт-16-1 (БР-6М), отличающиеся тем, что очистка петлевого воздуха от $CO_2$ производилась не в адсорберах, а в переключающихся теплообменниках-вымораживателях. Кроме того, в этих установках отсутствовала аппаратура (выносной конденсатор) для циркуляционной очистки жидкого кислорода от углеводородов.

Технические данные установок АКт-16-2 и АКт-16-1 приведены в табл. 4.5. Блок разделения воздуха этих установок может быть размещен вне здания цеха.

Общее уравнение теплового баланса установки АКт-16-2 имеет следующий вид:

$$\Delta i_{\text{др}}^{\text{н.д}} + B_{\text{дет}}\Delta i_{\text{т.д}} = (K + A_{\text{гр}})\, c_p \Delta t_{\text{рег}}^{\text{нас}} + (A_{\text{ч}} + B_{\text{с}})\, c_p \Delta t_{\text{рег}}^{\text{зм}} + K_{\text{т}}^{\text{в.д}} \left[ c_p^K \left( \Delta t_{\text{тепл}}^{\text{т}} + \Delta t_{\text{рег}}^{\text{зм}} \right) + \Delta i_K \right] + q_{\text{и}} \qquad (4.7)$$

где $\Delta i_{\text{др}}^{\text{н.д}}$ — эффект дросселирования воздуха низкого давления, *ккал/м³*;
$B_{\text{дет}}$ — доля детандерного воздуха, *м³/м³* п.в.;
$\Delta i_{\text{т.д}}$ — действительная холодопроизводительность детандера, *ккал/м³*;
$K$ — количество технологического кислорода, *м³/м³* п.в.;
$A_{\text{гр}}$ — количество отбросного (грязного) азота, *м³/м³* п.в.;
$c_p$ — теплоемкость азота и кислорода, $c_p = 0{,}312$ *ккал/(м³·град)*;
$c_p^K$ — теплоемкость сжатого кислорода, $c_p^K = 0{,}42$ *ккал/(м³·град)*;
$\Delta t_{\text{рег}}^{\text{нас}}$ — недорекуперация потоков, проходящих по насадке регенераторов (2,4 *град*);
$A_{\text{ч}}$ — количество чистого азота, *м³/м³* п.в.;
$K_{\text{т}}^{\text{в.д}}$ — количество сжатого технического кислорода, *м³/м³* п.в.;
$B_c$ — количество сухого воздуха, *м³/м³* п.в.;
$\Delta t_{\text{рег}}^{\text{зм}}$ — недорекуперация потоков, проходящих через змеевики регенераторов (6 *град*);
$q_{\text{и}}$ — холодопотери через изоляцию, $q_{\text{и}} = 1{,}65$ *ккал/м³* п.в.; включая потери холода, связанные с работой насоса (утечки, теплоприток от трения и из окружающей среды);
$\Delta t_{\text{тепл}}^{\text{т}}$ и $\Delta i_K$ — обозначают те же величины, что и в уравнении (4.6).

### 4.7.11. Установка АКт-17-1

Установка АКт-17-1 предназначена для крупных химических комбинатов. Она может выдавать одновременно чистый азот, технологический кислород, сжатый технический кислород и неоно-гелиевую смесь. Установка работает по циклу одного низкого давления с использованием для покрытия холодопотерь турбодетандеров, установленных на потоке чистого азота. Технологическая схема установки приведена на рис. 4.38.

Сжатый в турбокомпрессоре воздух (84 500—95 000 *м³/ч*, избыточное давление соответственно 5,4—6,0 *кгс/см²*) проходит скрубберы системы азотно-водяного охлаждения и поступает в регенераторы. Установка имеет два кислородных (*1*, *2*) и шесть азотных

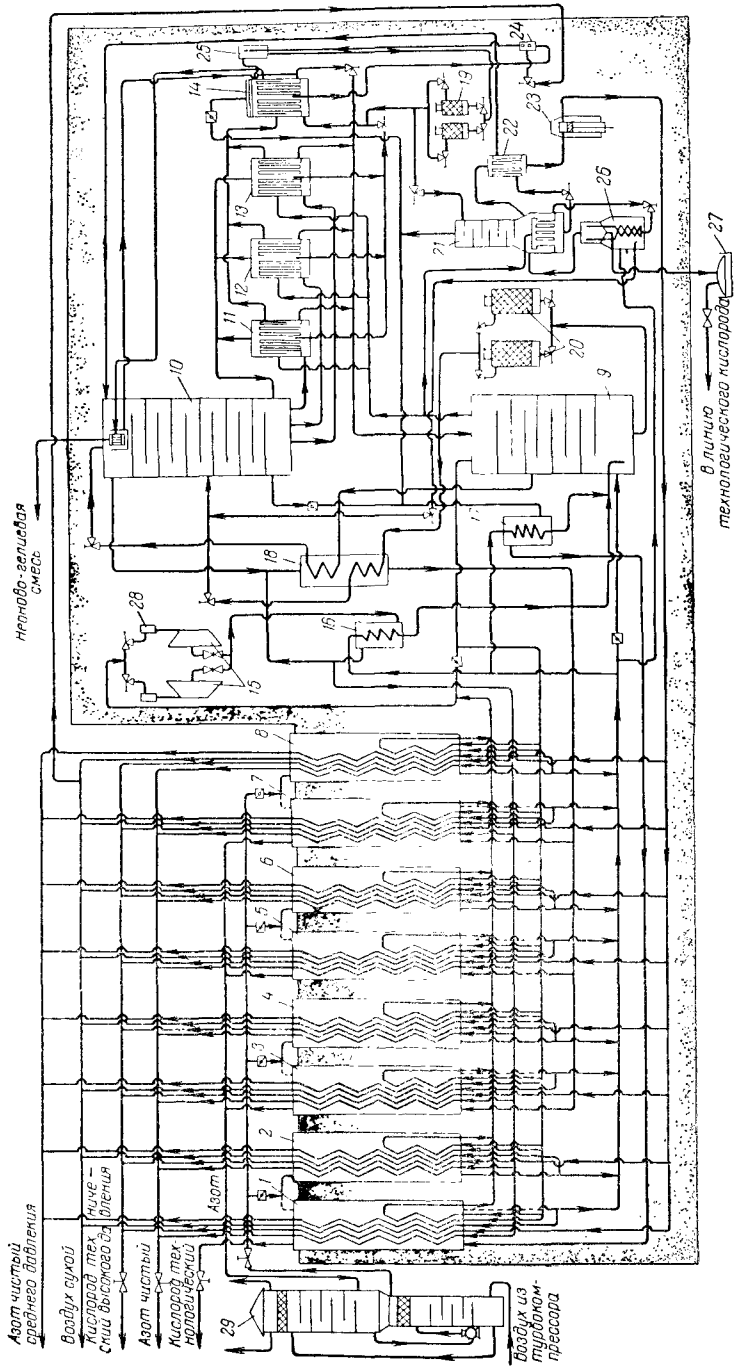



Рис. 4.38. Схема установки АКг-17-1:

*1, 2* — кислородные регенераторы; *3, 4, 5, 6, 7* и *8* — азотные регенераторы; *9* — нижняя колонна; *10* — верхняя колонна; *11, 12* и *13* — основные конденсаторы; *14* — выносной конденсатор; *15* — турбодетандеры; *16* — подогреватель чистого азота; *17* — подогреватель технологического кислорода; *18* — переохладитель жидкого азота и кубовой жидкости; *19* — адсорберы для очистки жидкого кислорода от ацетилена; *20* — адсорберы для очистки кубовой жидкости от ацетилена; *21* — колонна технического кислорода; *22* — конденсатор-переохладитель; *23* — насос для жидкого кислорода; *24* — форсунка парлифта; *25* — отделитель пара; *26* — конденсатор-испаритель; *27* — испаритель; *28* — детандерные фильтры.

(*3, 4, 5, 6, 7* и *8*) регенераторов диаметром 2800 *мм*. Насадка регенераторов — каменная (базальт), насыпная. В насадке регенераторов расположены змеевики из алюминиевых труб размером 24×2 *мм*, по которым проходят: чистый азот, технический кислород и сухой воздух. Небалансирующийся поток в регенераторах получается с помощью петли чистого азота, отбираемого из нижней колонны при избыточном давлении 5 *кгс/см*$^2$.

Продолжительность периода дутья в регенераторах 9 *мин*. Моменты переключения между каждой парой регенераторов сдвинуты на 2,25 *мин*. Переключение потоков газов производится клапанами принудительного действия, установленными на теплых концах регенераторов; на холодных концах находятся автоматические клапаны. Воздух из регенераторов поступает в куб нижней колонны *9*, в которой подвергается первичному обогащению кислородом, а затем через переключаемые силикагелевые адсорберы *20* и переохладитель *18* направляется в среднюю часть верхней колонны *10* для дальнейшей ректификации. Азот из нижней колонны отбирается в двух местах: жидкий азот из сборника, расположенного на уровне средней тарелки, отбирается на орошение верхней колонны и предварительно проходит через переохладитель *18*; газообразный азот высокой концентрации отбирается сверху нижней колонны и поступает в межтрубное пространство конденсаторов *11, 12, 13* и *14*, в один из турбодетандеров *15* и в змеевики петлевого потока регенераторов. Змеевики петлевого потока навиты только на определенную высоту от нижнего конца регенераторов, а вывод их наружу сделан внизу через днище регенератора.

Проходя через змеевики, петлевой поток азота подогревается до 180 °К, затем вновь смешивается с потоком азота из нижней колонны и поступает в турбодетандер *15*. Часть (около 1000 *м*$^3$/*ч*) чистого газообразного азота направляется в азотную секцию змеевиков регенераторов, где нагревается до положительной температуры, и поступает к потребителю под избыточным давлением 5 *кгс/см*$^2$.

Чистый газообразный $N_2$ из турбодетандера поступает в подогреватель *16* и далее — в змеевики регенераторов, откуда подается потребителю под давлением до 500 *мм вод. ст.* Часть чистого азота после подогревателя *16* примешивается к обратному потоку отходящего (грязного) азота. Газы по змеевикам регенераторов движутся непрерывно независимо от направления потоков газов в каменной насадке. Жидкий азот из конденсаторов *11, 12, 13* и *14* стекает в сборник нижней колонны, расположенный в ее верхней части, и используется в качестве флегмы для орошения тарелок нижней колонны. Газообразный азот из конденсаторов *11, 12, 13* и *14* отводится в концентратор неоно-гелиевой смеси, расположенный в сборнике азота верхней колонны, где конденсируется; жидкий азот сливается в сборник нижней колонны.

Получение технического кислорода и очистка жидкого кислорода из конденсатора *14* от углеводородов с помощью адсорбе-

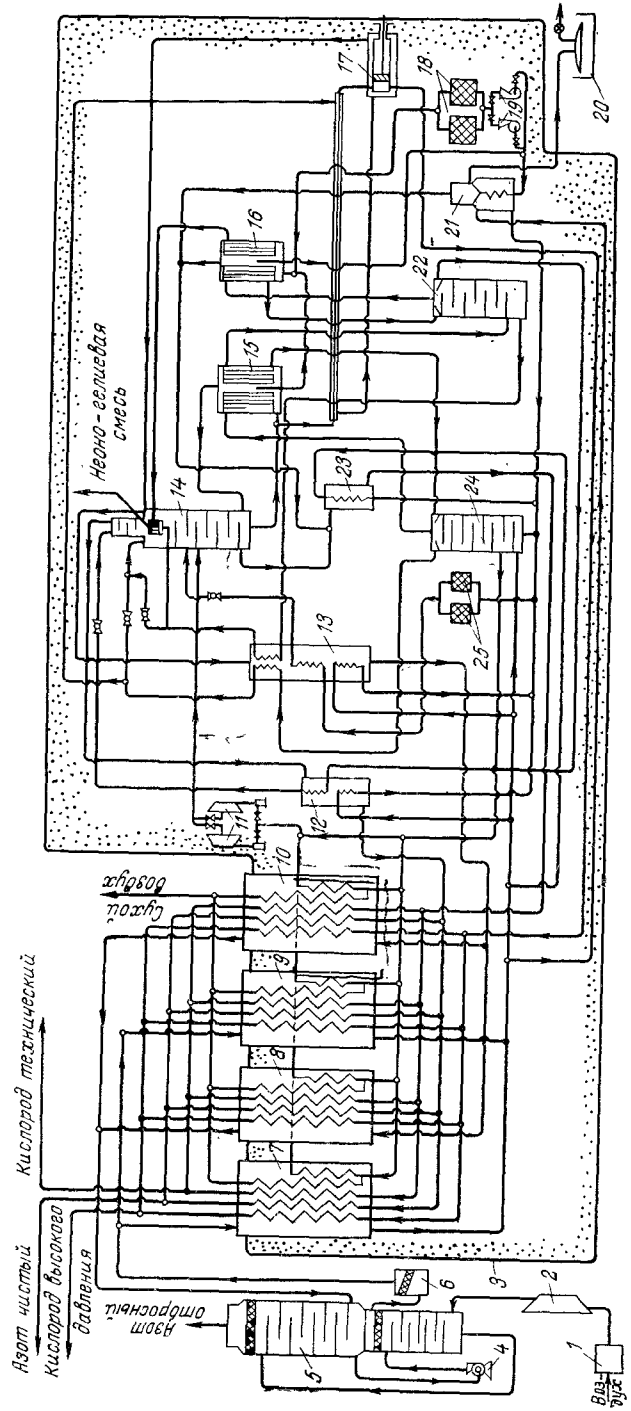



Рис. 4.39. Схема установки КА-5:

*1* — воздушный фильтр; *2* — турбокомпрессор; *3* — кожух; *4, 19* — центробежные насосы; *5* — скруббер; *6* — влагоотделитель; *7, 8, 9* и *10* — регенераторы; *11* — турбодетандеры; *12, 13* — переохладители-подогреватели; *14* — верхняя колонна; *15* — основной конденсатор; *16* — конденсатор азотной колонны; *17* — насос для жидкого кислорода; *18* — адсорбер; *20* — испаритель; *21* — испаритель-конденсатор; *22* — азотная колонна; *23* — теплообменник-подогреватель; *24* — нижняя колонна; *25* — адсорбер.

ров, включенных в циркуляционный контур с парлифтом *24, 25*, осуществляются так же, как и в установке АКт-16-2 (см. рис. 4.37). Техническая характеристика установки АКт-17-1 приведена в табл. 4.5.

### 4.7.12. Установка КА-5

Установка КА-5 (рис. 4.39) служит для получения технического кислорода и чистого азота. Сжатый в турбокомпрессоре *2* воздух проходит скруббер *5* азотно-водяного охлаждения и через влагоотделитель *6* направляется в регенераторы с каменной насадкой. Установка имеет четыре одинаковых по размерам регенератора, период переключения которых равен 9 *мин*. Моменты переключения для каждой пары регенераторов сдвинуты относительно друг друга на 4,5 *мин*. В качестве обратного потока во всех регенераторах используется отходящий (грязный) азот. По змеевикам регенераторов из установки отводятся технический кислород высокого давления, чистый азот, технический кислород низкого давления и сухой воздух для технологических нужд.

В качестве несбалансированного потока применяется детандерный воздух из нижней колонны, отбираемый после трех промывочных тарелок, и направляемый по змеевикам, расположенным в нижней части регенераторов. После смешивания с оставшейся частью детандерного воздуха из нижней колонны, его поток направляется на расширение в один из турбодетандеров *11*, а затем в верхнюю колонну. Чистый азот получается в азотной колонне *22* за счет ректификации паров азота, поступающих в нее из основного конденсатора *15* верхней колонны *14*. Флегма для орошения колонны *22* образуется в конденсаторе *16*, включенном последовательно с конденсатором *15*, что обеспечивает проточность кислорода в последнем.

От кислорода азот окончательно очищается ректификацией в дополнительной колонне, установленной в верхней части колонны *14*.

Колонна *14* снабжена также трубчаткой — концентратором неоно-гелиевой смеси, помещенном в сборнике азота верхней колонны. Циркуляция жидкого кислорода в системе конденсатора *16* для очистки жидкости от углеводородов осуществляется переключаемыми центробежными насосами *19*, подающими жидкий кислород через два переключаемых силикагелевых адсорбера *18* обратно в конденсатор *16*. Технические данные установки КА-5 приведены в табл. 4.5.

### 4.7.13. Установка КтК-35-2

Для удовлетворения потребностей в технологическом и техническом кислороде металлургических комбинатов при выплавке чугуна и производстве мартеновской и конверторной стали вы-

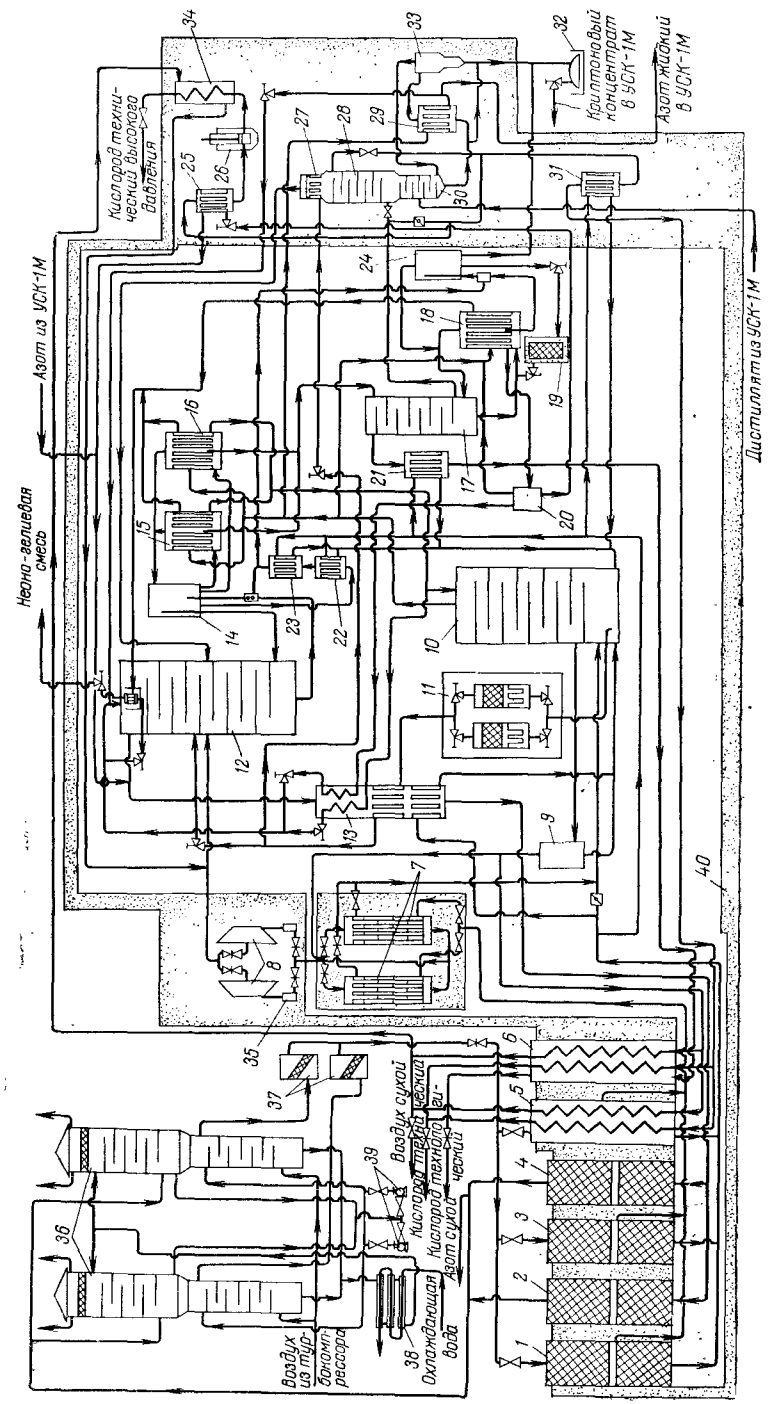



Рис. 4.40. Схема установки КтК-35-2:

*1, 2, 3* и *4* — азотные регенераторы; *5, 6* — кислородные регенераторы; *7* — вымораживатели; *8* — турбодетандеры; *9* — отделитель жидкости; *10* — нижняя колонна; *11* — фильтры-адсорберы; *12* — верхняя колонна; *13* — переохладитель кубовой жидкости и азотной флегмы; *14* — отделитель пара парлифта; *15, 16* — первый и второй конденсаторы; *17* — колонна технического кислорода; *18* — третий конденсатор; *19* — адсорбер для очистки жидкого кислорода от углеводородов; *20* — сборник азота; *21* — подогреватель технологического кислорода; *22* — подогреватель жидкого кислорода; *23* — конденсатор-испаритель; *24* — вспомогательный парлифт; *25* — конденсатор-переохладитель; *26* — насос для жидкого кислорода; *27* — верхний конденсатор; *28* — верхняя криптоновая колонна; *29* — нижний конденсатор; *30* — нижняя криптоновая колонна; *31* — подогреватель технического кислорода; *32* — испаритель криптонового концентрата; *33* — отделитель жидкости; *34* — теплообменник технического кислорода; *35* — детандерные фильтры; *36* — скрубберы азотно-во-

пускается установка КтК-35-2 (рис. 4.40). На этой установке получают технологический кислород, технический кислород, азот, криптоно-ксеноновый концентрат и неоно-гелиевую смесь[14].

Блок разделения воздуха может размещаться внутри и вне здания. Он имеет шесть регенераторов — два кислородных и четыре азотных. По насадке регенераторов отводится азот и технологический кислород. Технический кислород и сухой воздух отводятся по змеевикам, проложенным в насадке кислородных регенераторов. Насадка — каменная (базальтовая). Период переключения каждой пары азотных регенераторов 3 *мин*, кислородных 9 *мин*. Петлевой воздух отбирается из середины азотных и кислородных регенераторов при —125 °С и подвергается очистке от двуокиси углерода в переключаемых вымораживателях *7*, после чего поступает в куб нижней колонны *10*. Турбодетандерный воздух отбирается из нижней колонны после трех промывочных тарелок и через отделитель жидкости *9* идет в трубки вымораживателей *7*, затем расширяется в одном из турбодетандеров *8* и поступает на соответствующую тарелку верхней колонны.

Ректификация в нижней и верхней колоннах происходит, как обычно. Жидкий кислород из сборника верхней колонны парлифтом подается в отделитель пара *14*, а затем в конденсаторы *15* и *16*. Оставшаяся от испарения в этих конденсаторах часть жидкого кислорода поступает на ректификацию в колонну технического кислорода *17*. Испаритель *23* служит для получения паров, необходимых для работы парлифта. Жидкий технический кислород из колонны *17* испаряется в конденсаторе *18*, проходя перед испарением очистку от углеводородов в адсорбере *19*, включенном в циркуляционный контур со вспомогательным парлитфом *24*. Пары в форсунку этого парлифта поступают из конденсатора-испарителя *23* основного парлифта.

Отмывка криптоно-ксенона из технического кислорода производится в криптоновой колонне *28* и ее нижней части *30*. Газообразный технический кислород выводится через подогреватель *31* в змеевики регенераторов и далее направляется в газгольдер. Часть технического кислорода отводится в конденсатор-переохладитель *25*, откуда кислородным насосом *26* через теплообменник *34* направляется в баллоны или реципиенты под давлением до 165 *кгс/см*². Неоно-гелиевая смесь отводится из концентратора-трубчатки, расположенной в сборнике азота верхней колонны. Основные потоки газов и жидкостей обозначены на схеме.

Техническая характеристика установки КтК-35-2 приведена в табл. 4.3.

### 4.7.15. Установка КАр-30

Установка КАр-30 предназначена для получения технического кислорода, криптоно-ксенона, чистого аргона и неоно-гелиевой смеси (см. табл. 4.3). Технический кислород отводится по змеевикам,

проложенным в каменной насадке регенераторов, и выдается в очищенном (от влаги и двуокиси углерода) виде. Аргон можно получать жидким или газообразным под давлением до 200 *кгс/см*$^2$. Установка имеет четыре группы регенераторов, по три регенератора в каждой.

Охлажденный в регенераторах воздух очищается от углеводородов в двух газовых адсорберах, поэтому адсорберы на потоке кубовой жидкости не ставятся. Часть воздуха после газовых адсорберов отводится в турбодетандеры. Из этой части воздушного потока берется также и петлевой воздух, проходящий по змеевикам, проложенным в насадке регенераторов; петлевой воздух затем отбирается из середины змеевика (по высоте насадки) и присоединяется снова к потоку детандерного воздуха, подогревая его.

Жидкий кислород из сборника верхней колонны подается центробежным насосом в сборник, откуда равномерно распределяется по четырем конденсаторам, а затем выводится через центральные трубы в адсорберы для очистки от углеводородов. Технический 99,5%-ный кислород отводится со второй тарелки верхней колонны в змеевики регенераторов и далее направляется потребителю. Технический 99,7%-ный кислород отбирается из криптоновой колонны.

Газификация технического кислорода, подаваемого насосом под высоким давлением, производится в змеевиках регенераторов. Аргон получают сначала в виде сырого аргона (в колонне сырого аргона) из аргонной фракции, отбираемой с 27-й тарелки верхней колонны. Кубовая жидкость из нижней колонны подается на 47-ю тарелку верхней колонны.

Чистый аргон 99,9%-ной концентрации получают из технического аргона путем ректификации в колонне чистого аргона, установленной в блоке. В этой же колонне можно получать аргонокислородную смесь (содержащую 4% $O_2$ и 0,01% $N_2$) непосредственно из сырого аргона.

## 4.8. УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЖИДКОГО КИСЛОРОДА И ЖИДКОГО АЗОТА

В установках для получения жидкого кислорода и жидкого азота используют наиболее эффективные холодильные циклы: высокого давления с расширением воздуха в поршневом детандере, низкого давления с расширением воздуха в турбодетандере и комбинированные схемы низкого давления с использованием циркуляционного холодильного цикла среднего давления и расширения газа в турбодетандере.

### 4.8.1. Установки высокого давления

Принципиальная схема цикла установки высокого давления для получения жидкого кислорода показана на рис. 4.41. Уравнение теплового баланса цикла данной установки такое же, как и для



установки КЖ-1 [см. ниже уравнение (4.8)]. Если в установке нет теплообменника-ожижителя для предварительного охлаждения воздуха перед его поступлением в блок осушки, третий член в правой части уравнения (4.8) отсутствует.

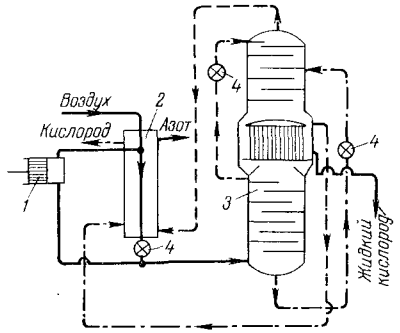



Рис. 4.41. Принципиальная схема цикла установки высокого давления для получения жидкого кислорода:

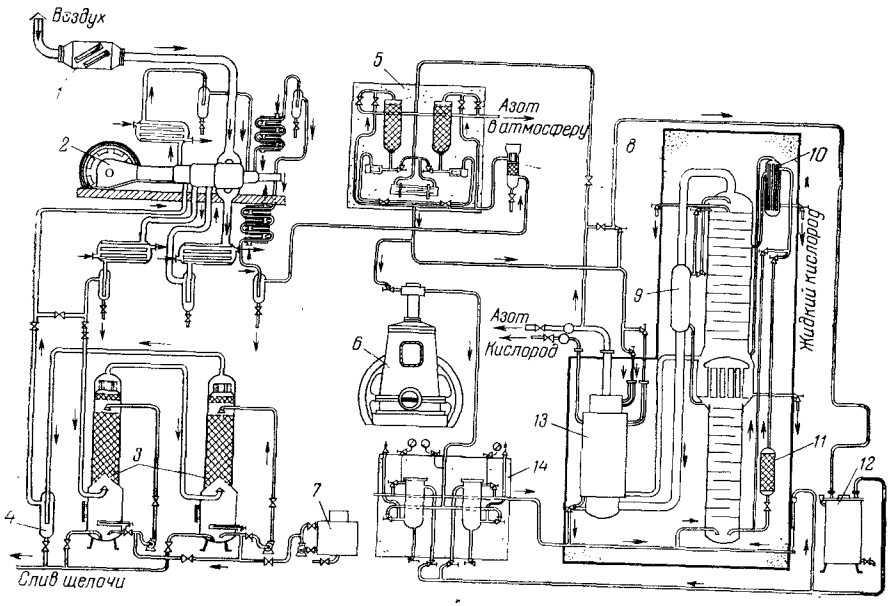
*1* — поршневой детандер; *2* — теплообменник; *3* — ректификационная колонна; *4* — дроссельные вентили.

#### 4.8.1.1. Установки КЖ-150 и КжАж-0,15-1

Установка КЖ-150 (рис. 4.42, *а*) предназначена для получения 150 *кг/ч* жидкого кислорода или 125 *м*$^3$*/ч* газообразного кислорода или 140 *кг/ч* жидкого азота.

Перерабатываемый воздух засасывается через фильтр *1* компрессором *2* типа 5Г-14/220. Проходя последовательно через два скруббера *3*, заполненные раствором едкого натра, воздух очищается от двуокиси углерода. Скрубберы со щелочеотделителем *4* включены после II ступени компрессора и работают при давлении 7—8,5 *кгс/см*$^2$. Из последней ступени компрессора воздух поступает в блок осушки *5* с баллонами, заполненными активным глинозёмом (регенерация адсорбента производится отходящим азотом, подогретым до 260—280 °С в электроподогревателе). Сжатый осушенный воздух поступает в теплообменник *13* блока разделения *8*, состоящий из двух секций: азотной и кислородной. Кислородная секция используется только при получении газообразного кислорода.

Примерно 50% сжатого воздуха после блока осушки поступает в поршневой детандер *6*, где расширяется до давления, которое поддерживается в нижней колонне, и через детандерные фильтры *14*, очищающие воздух от масла, вводится в куб нижней колонны. В куб нижней колонны вводится также остальная часть воздуха, прошедшего теплообменник. Жидкий азот из карманов нижней колонны подается через переохладитель на орошение тарелок верхней колонны. Кубовая жидкость подается в верхнюю колонну через адсорбер ацетилена *11*. Жидкий азот (продукт) отводится из сборника верхней колонны, а кислород отбирается из газового пространства основного конденсатора. Когда установка производит весь кислород в газообразном виде, его отводят из



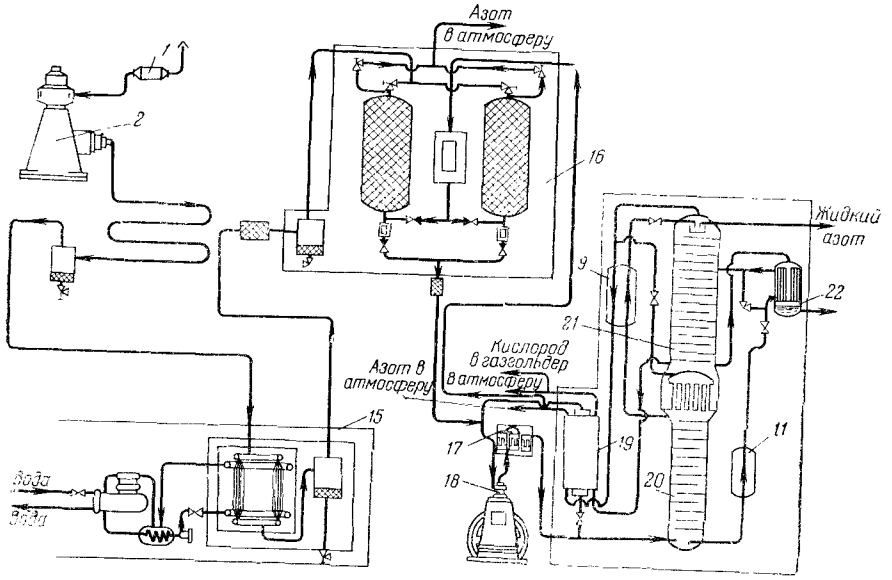




Рис. 4.42. Технологические схемы установок КЖ-150 и КжАж-0,15-1:

*а* — установка КЖ-150; *б* — установка КжАж-0,15-1; *1* — воздушный фильтр; *2* — воздушный компрессор; *3* — скрубберы щелочной очистки; *4* — щелочеотделитель; *5* — блок осушки; *6, 18* — детандеры; *7* — бак для приготовления раствора щелочи (едкого натра); *8* — блок разделения воздуха; *9* — переохладитель жидкого азота; *10, 22* — конденсаторы-переохладители; *11* — адсорбер ацетилена; *12* — подогреватель воздуха; *13, 19* — теплообменники; *14, 17* — блоки детандерных фильтров; *15* — фреоновый блок предварительного охлаждения; *16* — блок очистки и осушки воздуха цеолитами; *20* — нижняя колонна; *21* — верхняя колонна.

аппарата через кислородную секцию теплообменника; если же требуется жидкий кислород, то отбираемые из основного конденсатора пары кислорода направляются в конденсатор-переохладитель *10*; здесь они сжижаются и в виде переохлажденного жидкого кислорода сливаются в сборник. Для конденсации и переохлаждения кислорода в конденсатор-переохладитель *10* подается кубовая жидкость, поступающая в верхнюю колонну. Когда же установка работает в режиме получения только жидкого азота, конденсатор-переохладитель *10* отключают.

При получении газообразного кислорода детандер не работает и в холодильном цикле используется лишь дроссель-эффект (детандер включается только при пуске). Газообразный азот в этом режиме частично используется для регенерации адсорбента в блоке осушки; остальное количество азота выбрасывается в атмосферу через азотную секцию теплообменника *13*.

В установке применяется одноцилиндровый поршневой детандер ДВД-70/180 вертикального типа производительностью по воздуху 340 *м³/ч* (при 20 °С, 760 *мм рт. ст.*).

Технические данные, характеризующие установку КЖ-150, приведены в табл. 4.4.

В установке КжАж-0,15-1 (рис. 4.42, *б*) используется цикл высокого давления с поршневым детандером. Для комплексной очистки и осушки воздуха применяется цеолитовый блок. Предварительное охлаждение воздуха перед блоком очистки осуществляется фреоновым блоком типа ОФ. Количество перерабатываемого воздуха 1080 *м³/ч*.

Установка КжАж-0,15-1 может работать по трем режимам.

Первый режим — получение 200 *кг/ч* 99,2%-ного или 180 *кг/ч* 99,7%-ного жидкого кислорода.

Второй режим — получение 160 *м³/ч* 99,2%-ного или 145 *м³/ч* 99,7%-ного газообразного кислорода.

Третий режим — получение 150 *м³/ч* 99,2%-ного газообразного кислорода и одновременно 180 *кг/ч* жидкого 99%-ного азота.

Установка КжАж-0,15-1 обладает всеми преимуществами современных установок с комплексной очисткой и осушкой воздуха цеолитами. Она заменяет установку КЖ-150.

### *4.8.1.2. Установка Кж-1,6 (КЖ-1)*

Установка Кж-1,6 (КЖ-1) предназначена для получения значительных количеств жидкого кислорода и жидкого азота. Атмосферный воздух через фильтр *1* (рис. 4.43) засасывается поршневым компрессором и сжимается последовательно в пяти ступенях. После II ступени воздух последовательно проходит через насадку скрубберов *6*, орошаемую раствором щелочи, для очистки от двуокиси углерода, после чего через отделитель щелочи направляется в III ступень компрессора (раствор щелочи приготовляется в ба-

ке *3*). Из V ступени воздух под избыточным давлением 160—170 *кгс/см*² направляется в змеевик дополнительного холодильника *16*, где охлаждается холодной водой, предварительно прошедшей азотно-водяной испарительный охладитель *14*. Затем через

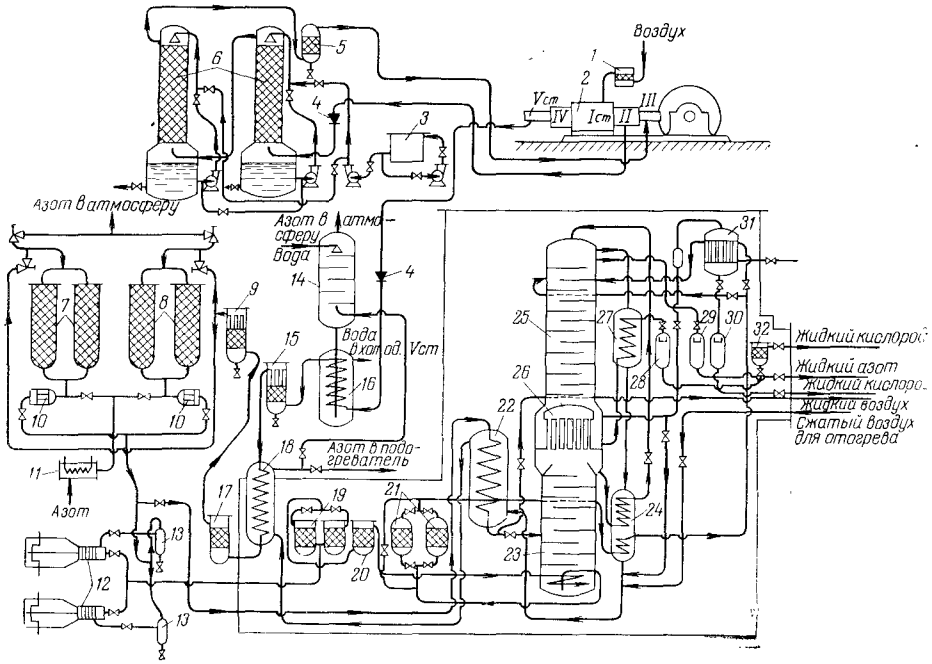



Рис. 4.43. Схема установки высокого давления КЖ-1 (КЖ-1,6) для получения жидкого кислорода:

*1* — воздушный фильтр; *2* — пятиступенчатый воздушный компрессор на избыточное давление 200 *кгс/см*²; *3* — бак для приготовления раствора щелочи; *4* — обратный клапан; *5* — щелочеотделитель; *6* — щелочные скрубберы для очистки воздуха от $CO_2$; *7, 8* — адсорберы блока осушки; *9, 17* — влагоотделители; *10* — фильтры; *11* — подогреватель азота; *12* — поршневые детандеры; *13* — ресиверы-маслоотделители; *14* — азотно-водяной испарительный водоохладитель; *15* — масло-влагоотделитель; *16* — дополнительный холодильник для сжатого воздуха; *18* — ожижитель; *19, 20* — детандерные фильтры; *21* — адсорберы ацетилена; *22* — основной теплообменник; *23* — нижняя колонна; *24* — переохладитель кубовой жидкости и азотной флегмы; *25* — верхняя колонна; *26* — основной конденсатор; *27* — переохладитель жидкого кислорода; *28* — мерник жидкого кислорода; *29* — мерник жидкого азота; *30* — мерник сконденсированного (очищенного от масла и ацетилена) жидкого кислорода; *31* — дополнительный конденсатор; *32* — фильтр для жидкого кислорода.

масло-влагоотделитель *15* воздух поступает в ожижитель *18*, где охлаждается до плюс 4 — плюс 6 °С потоком отходящего азота. Из ожижителя воздух поступает (через влагоотделители *17* и *9*) в адсорберы *7* и *8* блока осушки, где активным глиноземом из воздуха удаляется влага.

Поток осушенного воздуха, пройдя через фильтры *10*, разделяется на две части. Одна часть (50—55%) направляется в поршневые детандеры *12*, где расширяется до избыточного давления 4,5—5 *кгс/см*², охлаждается при этом до минус 130 — минус 135 °С и через фильтры *19* и *20* из ткани, удерживающие частицы твердого масла, поступает в куб нижней колонны *23*. Остальная часть сжатого воздуха поступает в основной теплообменник *22*, охлаждается потоком отходящего азота до —160 °С и дросселируется в середину нижней колонны, где подвергается ректификации.

Кубовая жидкость через силикагелевые адсорберы ацетилена *21* поступает в переохладитель *24* и затем подается на соответствующую тарелку верхней колонны *25*. На верхнюю тарелку верхней колонны через переохладитель *24* и азотный расширительный вентиль подается азотная флегма из карманов основного конденсатора *26*. Жидкий 99,5%-ный кислород сливается из основного конденсатора в цистерну через переохладитель *27*, мерник *28* и фильтр *32*.

При получении жидкого медицинского кислорода иногда используется дополнительный конденсатор *31*, в трубках которого пары кислорода из основного конденсатора *26* сжижаются кубовой жидкостью, подаваемой в межтрубное пространство конденсатора *31* перед поступлением ее на ректификацию в верхнюю колонну *25*. Жидкий кислород из дополнительного конденсатора, не содержащий примеси масла и ацетилена, сливают в емкость через мерник *30*. Из сборника, имеющегося в верхней части верхней колонны, часть жидкого азота может отбираться в виде продукта через мерник *29*.

Производительность установок описанной схемы составляет 1600 *кг/ч* жидкого кислорода. При более высокой производительности усложняется эксплуатация поршневых компрессоров и детандеров вследствие увеличения их размеров. Установка КЖ-1 весьма экономична — удельный расход энергии не превышает 1,1—1,2 *квт·ч* (3960—4320 *кдж*) на 1 *кг* жидкого кислорода. Пусковой период установки 6—8 *ч*, продолжительность рабочей кампании 4—6 месяцев.

Уравнение общего теплового баланса для установки типа КЖ-1 имеет следующий вид:

$$\Delta i_{\text{др}} + B_{\text{дет}}\Delta i_{\text{дет}} = K\left(i^{1}_{303} - i^{1,04}_{87,9}\right) + Ac_p(T_0 - T_1) + c_p^{\text{в.д}}(T_3 - T_2) + q_{\text{и}} \quad (4.8)$$

где $\Delta i_{\text{др}}$ — эффект дросселирования воздуха, $\Delta i_{\text{др}} = (i^{1}_{393} - i^{180}_{303}) = 10{,}4$ *ккал/м*³ п.в.;

$B_{\text{дет}}$ — доля детандерного воздуха, *м*³/*м*³ п.в.;

$\Delta i_{\text{дет}}$ — фактическая холодопроизводительность детандера, $\Delta i_{\text{дет}} = (i^{18}_{278} - i^{6}_{\text{ад}})\eta_{\text{дет}} = (126{,}2 - 79{,}2)\cdot 0{,}75 = 35{,}2$ *ккал/м*³

($\eta_{\text{дет}}$ — адиабатный к.п.д. поршневых детандеров, $\eta_{\text{дет}} = 0{,}75$);

$K$ — количество получаемого жидкого кислорода (в пересчете на газ), *м*³/*м*³ п.в.;

$i^{1}_{303}$ — энтальпия кислорода при $T_0$, $i^{1}_{303} = 148{,}5$ *ккал/м*³;

$i^{1,04}_{87,9}$ — энтальпия кислорода при $T_6$, $i^{1,04}_{87,9} = 5{,}7$ *ккал/м*³; $T_6 = 87{,}9$ °К — — температура кислорода на выходе из блока разделения с учетом переохлаждения;

$A$ — количество отбросного азота, $A = 1 - K$, $м^3/м^3$ п.в.;
$c_p$ — теплоемкость азота при давлении 1 $кгс/см^2$, $c_p = 0{,}312$ $ккал/(м^3 \cdot град)$.
$c_p^{в.д}$ — теплоемкость воздуха при давлении цикла, равном 180 $кгс/см^2$, $c_p^{в.д} = 0{,}413$ $ккал/(м^3 \cdot град)$;
$T_0$ — температура воздуха на входе в теплообменник-ожижитель *18* (см. рис. 4.43), $T_0 = 303$ °К;
$T_1$ — температура азота на выходе из теплообменника-ожижителя *18* $T_1 = 300$ °К;
$T_2$ — температура воздуха после теплообменника-ожижителя *18* $T_2 = 275$ °К;
$T_3$ — температура воздуха на входе в основной теплообменник *22* (подогрев в блоке осушки на 3 *град*), $T_3 = 278$ °К;
$q_и$ — потеря холода в окружающую среду через изоляцию, $q_и = 1{,}5$ $ккал/ч$ п. в.
$T_4 = 103$°К—температура воздуха после теплообменника *22*.

Решая уравнение (4.8), находим:

$$B_{дет} = 4{,}07K - 0{,}193 \qquad (4.8,а)$$

Для получения второй аналогичной зависимости между $B_{дет}$ и $K$ составляем уравнение теплового баланса теплообменников *18* и *22*:

$$A\left(i^1_{300} - i^1_{93}\right) = i^{180}_{303} - i^{180}_{275} + (1 - B_{дет})\left(i^{180}_{278} - i^{180}_{103}\right) + q'_и + q''_и \qquad (4.9$$

где $i^1_{300}$ — энтальпия азота после ожижителя *18*, $i^1_{300} = 145$ $ккал/м^3$;
$i^1_{93}$ — энтальпия азота перед основным теплообменником *22*, $i^1_{93} = 80{,}2$ $ккал/м^3$;
$i^{180}_{303}$ — энтальпия воздуха перед ожижителем *18*, $i^{180}_{303} = 135$ $ккал/м^3$;
$i^{180}_{275}$ — энтальпия воздуха после ожижителя *18*, $i^{18}_{275} = 124{,}2$ $ккал/м^3$;
$i^{180}_{278}$ — энтальпия воздуха перед основным теплообменником *22*, $i^{180}_{278} = 126{,}2$ $ккал/м^3$;
$i^{180}_{103}$ — энтальпия воздуха после теплообменника *22*, $i^{180}_{1\cdot 3} = 30{,}3$ $ккал/м^3$;
$q'_и$ — потери холода в окружающую среду через изоляцию ожижителя *18* $q'_и = 0{,}2$ $ккал/м^3$ п.в.;
$q''_и$ — потери холода в окружающую среду через изоляцию теплообменника *22*, $q''_и = 0{,}3$ $ккал/м^3$ п.в.;

Решая уравнение (4.9), получаем:

$$B_{дет} = 0{,}677K + 0{,}443 \qquad (4.9,а)$$

Из уравнений (4.8, *а*) и (4.9, *а*) определяем значения $K$ и $B_{дет}$

$$K = 0{,}187 \ м^3/м^3 \text{ п. в.}; \qquad B_{дет} = 0{,}569 \ м^3/м^3 \text{ п. в.}$$

Из уравнения материального баланса находим концентрацию отбросного азота $y_A$. При получении 99,5%-ного кислорода она равна

$$y_A = \frac{y_B - Ky_K}{1 - K} = \frac{1{\cdot}79 - 0{,}187{\cdot}0{,}5}{1 - 0{,}187} = 97\% \ N_2$$



Если паспортная производительность воздушного компрессора составляет 6000 $м^3/ч$, то при потерях на продувки 5% воздуха количество перерабатываемого воздуха

$$B = 0{,}95 \cdot 6000 = 5700 \ м^3/ч$$

Тогда количество получаемого жидкого кислорода

$$K_ж = 0{,}187 \cdot 1{,}43 \cdot 5700 = 1530 \ кг/ч$$

где 1,43 $кг/м^3$ — плотность кислорода.

Количество воздуха, направляемое в детандеры

$$B_{дет} = 5700 \cdot 0{,}569 = 3265 \ м^3/ч$$

### *4.8.1.3. Модификации установок типа КЖ-1*

На базе установки КЖ-1 создан ряд модифицированных установок: КЖ-1Ар (КжАр-1,6), КЖГ-1 (АжК-1,6), КЖА-1 (КжААр-1,6), ЖА-1 (Аж-1,6). Техническая характеристика этих установок приведена в табл. 4.4.

**Установка КЖ-1Ар (КжАр-1,6)**, схема которой показана на рис. 4.44, (см. Приложение), предназначена для получения 1600 $кг/ч$ жидкого 99,2%-ного кислорода, 45 $м^3/ч$ сырого 92%-ного аргона и до 150 $м^3/ч$ газообразного 99,2%-ного кислорода.

Если из установки КЖ-1Ар не отбирать аргон, можно получать одновременно жидкий кислород и жидкий азот при общем количестве жидких продуктов разделения 1600 $кг/ч$. При одновременном получении кислорода и азота концентрация жидкого азота составляет 98%, а при получении только жидкого азота — 99,5%. Число тарелок в верхней колонне увеличено до 48. На установке, укомплектованной дополнительной колонной для очистки сырого аргона от азота, можно получать чистый аргон. Предварительная очистка аргона от примеси кислорода производится в этом случае на установке типа УТА.

**Установка КЖГ-1 (АжК-1,6)** предназначена для одновременного получения 1100 $м^3/ч$ газообразного 99,5%-ного кислорода и 1600 $кг/ч$ жидкого 98%-ного азота.

**Установка КЖА-1 (КжААр-1,6)** служит для получения одновременно: 150 $м^3/ч$ 99,5%-ного газообразного кислорода, 5000 $м^3/ч$ газообразного 99,9%-ного азота, 1200 $кг/ч$ жидкого 99,5%-ного кислорода и до 45 $м^3/ч$ сырого аргона. На установке КЖА-1, дополненной циркуляционным азотным циклом, можно получать чистый азот.

**Установка ЖА-1 (Аж-1,6)** предназначена для одновременного получения 1600 $кг/ч$ жидкого 98%-ного азота и до 700 $м^3/ч$ газообразного азота той же концентрации. В установке ЖА-1 имеется только одна (нижняя) ректификационная колонна. Технологическая схема установки ЖА-1 приведена на рис. 4.45.

Одним из недостатков установок высокого давления для получения жидкого кислорода является возможность (при нарушении правил эксплуатации) загрязнения кислорода продуктами разложения масла, образующимися в цилиндрах воздушных компрессоров, и маслом из цилиндров детандеров. Для исключения такого загрязнения приходится специально очищать перерабатываемый

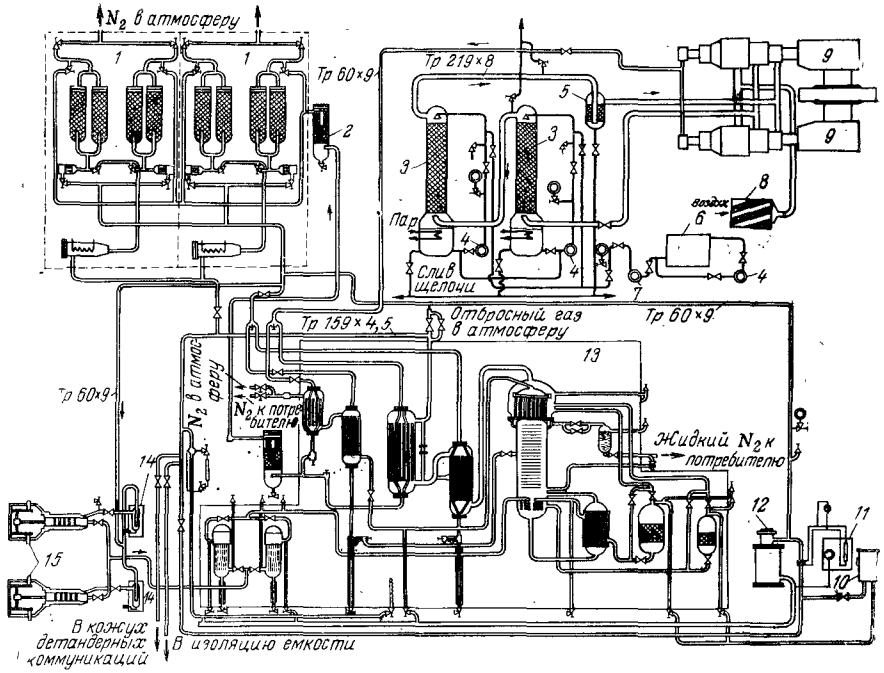



Рис. 4.45. Технологическая схема установки ЖА-1:

*1* — блок осушки воздуха; *2* — влагоотделитель; *3* — скрубберы; *4* — центробежные насосы; *5* — щелочеотделитель; *6* — бак для приготовления раствора едкого натра; *7* — вихревой насос; *8* — воздушный фильтр; *9* — поршневые воздушные компрессоры; *10* — подогреватель мощностью 5,5 *квт*; *11* — щит подогревателя; *12* — подогреватель мощностью 50 *кв*; *13* — блок разделения воздуха; *14* — ресиверы детандерного воздуха; *15* — поршневые детандеры.

воздух от масла и его погонов. Способы очистки от масла, применяемые на предприятиях, значительно снижают загрязнение воздуха парами масла и повышают безопасность работы установок с поршневыми компрессорами и детандерами.

Применение в установках высокого давления поршневых машин, аппаратов и трубопроводов высокого давления также является определенным недостатком, так как при этом усложняются обслуживание и ремонт оборудования.

Дополнительные конденсаторы в установках высокого давления позволяют производить отбор газообразного кислорода из основного конденсатора с последующей конденсацией его в допо



нительном конденсаторе-переохладителе и получать таким образом жидкий кислород, свободный от загрязняющих примесей — ацетилена, масла и пр. Однако при этом не исключается возможность накопления взрывоопасных примесей в жидком кислороде основного конденсатора. При нарушении правил эксплуатации это может явиться причиной взрыва в основном конденсаторе. Поэтому в установках с дополнительным конденсатором основной конденсатор следует делать проточным и периодически сливать из него жидкий кислород для удаления взрывоопасных загрязнений*.

### 4.8.2. Установки низкого давления

Установки низкого давления для получения жидкого кислорода, впервые разработанные академиком П. Л. Капицей, были внедрены в нашу промышленность в 1943—1945 гг. В последующие годы жидкостные установки низкого давления начали выпускать также и в других странах.

Принципиальная схема установки низкого давления для получения жидкого кислорода дана на рис. 4.46. Уравнение теплового баланса установки низкого давления для получения жидкого кислорода имеет вид:

$$\Delta i_{\text{др}} + B_{\text{дет}}\Delta i_{\text{дет}} = B_{\text{отх}} c_p \Delta t + K\Delta i_{\text{К.ж}} + q_{\text{п}} \qquad (4.10)$$

где $B_{\text{отх}}$ — доля отходящего воздуха, $м^3/м^3$ п.в.;

$\Delta t$ — недорекуперация на теплом конце регенераторов, *град*;

$\Delta i_{\text{К.ж}}$ — разность энтальпий газообразного кислорода (при 1 *кгс/см* и 303 °К) и жидкого кислорода (при 1 $кгс/см^2$), $ккал/м^3$; $\Delta i_{\text{К.ж}} = 5{,}7$ $ккал/м^3$.

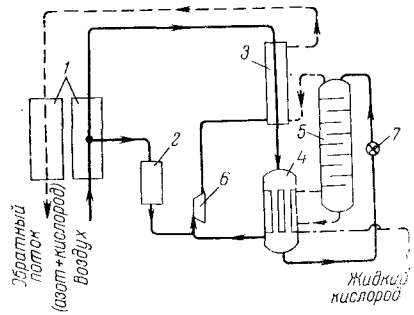



Рис. 4.46. Принципиальная схема цикла установки низкого давления для получения жидкого кислорода:

*1* — регенераторы (переключаемые теплообменники); *2* — адсорбер двуокиси углерода; *3* — ожижитель; *4* — конденсатор-испаритель; *5* — ректификационная колонна; *6* — турбодетандер; *7* — дроссельный вентиль.

Величины $B_{\text{дет}}$ и $K$ в уравнении (4.10) связаны между собой условиями ректификации, так как количество получаемого кислорода $K$ зависит от количества вводимого в колонну детандерного воздуха $B_{\text{дет}}$. Обычно $B_{\text{дет}} = 0{,}75—0{,}78$ $м^3/м^3$ п. в.; $q_{\text{п}} = 0{,}95$ $ккал/м^3$ п. в. При этих условиях $K = 0{,}045—0{,}050$ $м^3/м^3$ п. в.

В установке низкого давления фирмы «Эйр-Продактс» (США) для получения жидкого кислорода (рис. 4.47) атмосферный воздух через фильтр 1 засасывается турбокомпрессором *2*, сжимается в нем

* Надобность в проточном основном конденсаторе отпадает при применении компрессоров и детандеров, работающих без смазки поршневых колец, а также при использовании цеолитовых блоков комплексной очистки и осушки воздуха.

до избыточного давления 7 *кгс/см²* и охлаждается в концевом холодильнике *3*. Пройдя влагоотделитель *4*, воздух через систему принудительно действующих распределительных клапанов *7* поступает в переключаемые теплообменники (так называемые регенераторы-рекуператоры) *8*, где охлаждается до температуры примерно — 170 °С потоком воздуха, отходящего из ректификационной колонны *12*, и потоком холодного петлевого воздуха, расширившегося в турбодетандере *9*.

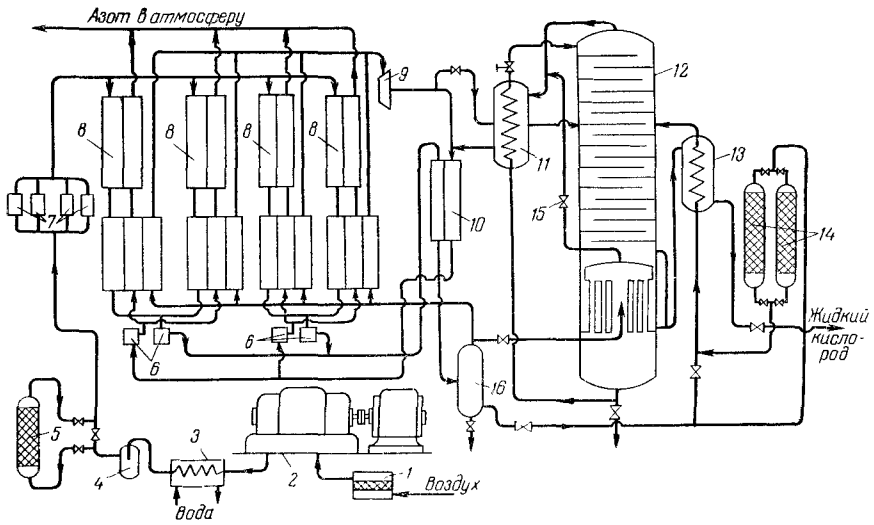



Рис. 4.47. Принципиальная схема установки «Эйр-Продактс» низкого давлени для получения жидкого кислорода:

*1* — воздушный фильтр; *2* — турбокомпрессор; *3* — концевой холодильник для воздуха; *4* — в гоотделитель; *5* — блок адсорбционной осушки воздуха (при пуске); *6* — автоматическ клапаны холодного конца теплообменников; *7* — принудительные клапаны теплого кон теплообменников; *8* — регенераторы-рекуператоры (теплообменники); *9* — турбодетанде *10* — ожижитель; *11* — переохладитель; *12* — ректификационная колонна; *13* — переохлад гель чистого жидкого кислорода; *14* — адсорберы ацетилена; *15* — вентиль; *16* — отделите жидкости.

В теплообменниках прямой и обратный потоки воздуха пери дически переключаются с тем, чтобы обратный поток направлял через те каналы теплообменника, по которым до этого проход сжатый воздух прямого потока. Этим обеспечивается вынос д окиси углерода и влаги, оседающих на насадке теплообменника время прохождения воздуха прямого потока. Недорекуперация теплом конце теплообменников *8* составляет около 3 *град*.

Для более полной самоочистки насадки температуры прямо и обратного потоков на холодном конце теплообменника сближ ют применением воздушной петли. Для этого в теплообменник на холодном конце имеется третий канал, по которому проход петлевой воздух, отбираемый от основного потока, прошедш ожижитель *10* и поступившего в отделитель жидкости *16*. Петл



вой поток воздуха после нагревания в теплообменниках до —145 °С расширяется в турбодетандере *9* до 0,4 *кгс/см²* и направляется в ожижитель *10*. Затем через теплообменники *8* петлевой воздух направляется в атмосферу, смешиваясь с обратным потоком воздуха из верхней части колонны *12*. Часть петлевого воздуха после турбодетандера может быть также введена на соответствующую тарелку ректификационной колонны.

После теплообменников *8* воздух при температуре около —168 °С через автоматические клапаны *6* поступает в ожижитель *10*, где частично сжижается, и направляется в отделитель жидкости *16*. Жидкий воздух из отделителя дросселируется вентилем до 0,4 *кгс/см²*, очищается от ацетилена в силикагелевых адсорберах *14* и через переохладитель чистого жидкого кислорода *13* поступает на соответствующую тарелку ректификационной колонны *12*. Силикагель в адсорберах регенерируется продувкой сухим нагретым воздухом через каждые 150—200 *ч* работы.

Несжижившаяся часть воздуха из отделителя жидкости *16* распределяется на два потока. Один поток (около 72% перерабатываемого воздуха) направляется в теплообменники *8* в качестве петлевого воздуха, после чего поступает на расширение в турбодетандер *9* и затем присоединяется к потоку обратного газа из колонны *12*.

Второй поток (остальные 28% воздуха) из отделителя жидкости дросселируется вентилем до избыточного давления 3,6 *кгс/см²* и поступает в трубное пространство конденсатора колонны *12*, где сжижается вследствие испарения кислорода, кипящего в межтрубном пространстве конденсатора при избыточном давлении 0,3 *кгс/см²*. Полученная в конденсаторе жидкость поступает в переохладитель *11*, дросселируется вентилем до давления 0,3 *кгс/см²* и подается в качестве флегмы на орошение верхней тарелки колонны *12*. Вентиль *15* служит для отвода из-под крышки конденсатора неоно-гелиевой смеси.

Получаемый жидкий 99,5%-ный кислород в переохладителе *13* переохлаждается на 4—5 *град* и при температуре около — 184 °С сливается в стационарную цистерну.

Длительность пускового периода установки — около 5 *ч*. Отогрев теплообменников производится через 15 дней в течение примерно 8 *ч*. При запуске установки и первоначальном охлаждении теплообменников воздух подвергается адсорбционной осушке активным глиноземом в блоке осушки *5*.

Производительность установок низкого давления определяется производительностью воздушного компрессора и составляет от 2000 до 7000 *кг/ч*. Удельный расход энергии 1,4—1,6 *квт·ч* (5000—5800 *кдж*) на 1 *кг* жидкого кислорода.

Степень извлечения кислорода из перерабатываемого воздуха составляет 5%.

Основные преимущества установок низкого давления — отсутствие аппаратуры и арматуры высокого давления, простота техноло-

гической схемы и отсутствие загрязнения жидкого кислорода продуктами разложения смазочного масла. Недостатком этих установок является относительно больший удельный расход электроэнергии на получение 1 *кг* жидкого кислорода, чем на установках высокого давления.

### 4.8.3. Установки низкого давления с циркуляционным азотным холодильным циклом

Для уменьшения расхода энергии в установках низкого давления применяется также азотный циркуляционный холодильный цикл. Воздух сжимается турбокомпрессором *1* (рис. 4.48) до избыточного давления 4,5 *кгс/см²*, проходит концевой холодильник *2*

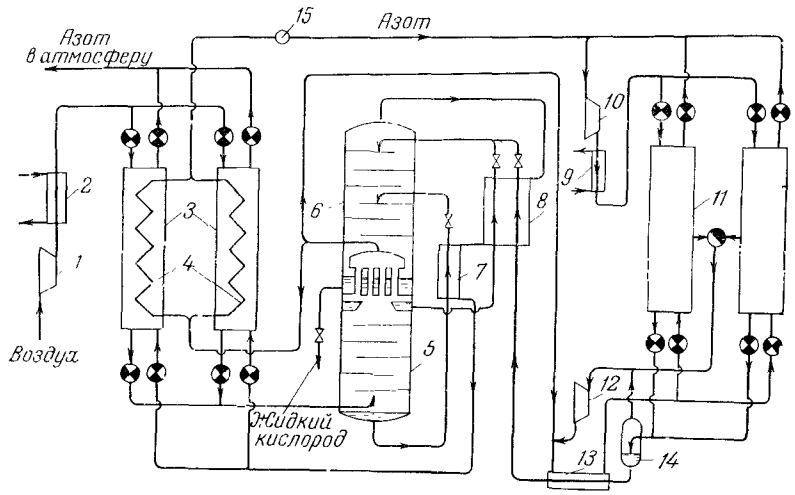



Рис. 4.48. Схема установки низкого давления с использованием азотного циркуляционного холодильного цикла для получения жидкого кислорода:

*1* — турбокомпрессор; *2* — концевой хольдильник для воздуха; *3* — регенераторы с насыпной насадкой; *4* — змеевики для отбора чистого азота; *5* — нижняя ректификационная колонна; *6* — верхняя ректификационная колонна; *7*, *8* — переохладители; *9* — холодильник сжатого азота; *10* — азотный турбокомпрессор; *11* — азотные регенераторы циркуляционного цикла; *12* — турбодетандер; *13* — теплообменник; *14* — отделитель жидкости (сепаратор) *15* — обратный клапан.

и один из регенераторов *3* и направляется в куб нижней колонны *5* Кубовая жидкость из колонны *5* через переохладитель *7* дроссе лируется в середину верхней колонны *6*, где подвергается оконча тельному разделению на жидкий кислород, сливаемый из конден сатора в цистерну, и газообразный азот, отводимый через пере охладители *7* и *8* в регенераторы *3*, а затем в атмосферу. На верхнюю тарелку верхней колонны *6* подается в качестве флегмы жидкий азот из карманов конденсатора, прошедший переохладитель *8*.



Из-под крышки конденсатора отбирается азот, который делится на два потока. Один поток проходит через змеевики *4*, расположенные в насадке регенераторов *3*, охлаждает прямой поток сжатого воздуха и затем направляется в турбокомпрессор *10*, где сжимается до избыточного давления 16—30 *кгс/см²*.

После холодильника *9* сжатый азот направляется в один из регенераторов *11*. Часть азота отбирается из середины регенератора и расширяется в турбодетандере *12* до избыточного давления 4 *кгс/см²*, после чего присоединяется ко второму потоку азота, отбираемого из-под крышки основного конденсатора; второй поток азота через теплообменник *13* (вместе с первым потоком) направляется в регенераторы навстречу потоку сжатого азота.

Нагретый в регенераторах *11* азот вновь поступает на сжатие в азотный турбокомпрессор *10*, и цикл замыкается. Азот, прошедший до холодного конца регенераторов *11*, делится на две части: жидкая фаза через отделитель жидкости *14* поступает в теплообменник *13* и переохладитель *8*, где дополнительно охлаждается, и затем дросселируется на верхнюю тарелку верхней колонны *6*; азот паровой фазы из отделителя жидкости *14* примешивается к потоку циркуляционного азота, поступающему в турбодетандер *12*.

В некоторых подобных установках зарубежных фирм вместо регенераторов используются переключаемые пластинчатые теплообменники.

По удельному расходу электроэнергии на получение 1 *кг* жидкого кислорода установки с циркуляционным циклом более экономичны, чем установки только одного низкого давления. В установках с циркуляционным циклом удельный расход энергии на 1 *кг* жидкого кислорода только на 10—15% выше, чем в установках с циклом высокого давления.

Циркуляционный азотный цикл применяется в отечественных установках низкого давления К-12Ж (БР-1Ж), которые могут давать одновременно 7800 *м³/ч* газообразного технологического 95%-ного кислорода и 6000 *кг/ч* жидкого технического 99,5%-ного кислорода или 5500 *кг/ч* жидкого 99,98%-ного азота.

По технологической схеме установка К-12Ж (БР-1Ж) идентична установке Кт-12 (БР-1), но имеет дополнительно: блок циркуляционных теплообменников, выполненных из оребренных медных трубок; два азотных турбокомпрессора (используются серийные турбокомпрессоры КТК-12,5/35 для кислорода); два двухступенчатых азотных турбодетандера ТДР-29/30; цеолитовый блок осушки. Установка может работать как в газожидкостном, так и в газовом режиме. При газовом режиме она выдает те же продукты разделения, что и установка Кт-12 (БР-1). При получении жидкого кислорода криптоновая колонна не работает, так как весь криптон отводится с жидким кислородом. Давление азота в циркуляционном цикле до и после турбодетандеров составляет соответственно 30 и 1,25 *кгс/см²*, количество азота, отбираемого из середины регенераторов в циркуляционный цикл, равно 1000—

Таблица 4. 3. **Технические данные установок для получения технического и технологического кислорода**

| | Установки | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | К-0,04 (КГН-30) | УКГС-100 | К-0,15 | КГ-300М | К-0,4 | КТ-1000М | К-1,4 (БР-14) |
| Производительность, *м³/ч* | | | | | | | |
| кислород технический . . . | 30—35 | 105—120 | 165*/90 | 300 | 420*/230 | 1100—1150 | 1400 |
| кислород технологический . | — | — | — | — | — | — | — |
| азот чистый . . . . . | — | — | — | — | — | — | — |
| криптоно-ксеноновый концентрат (0,1—0,2%-ный Kr + Xe) в пересчете на 100%-ный продукт, *дм³/ч* | — | — | — | — | — | — | — |
| неоно-гелиевая смесь, 40%-ная (Ne + He), *м³/ч* | — | — | — | — | — | — | — |
| Концентрация, % | | | | | | | |
| технического кислорода | 99,5 | 99,5 | 99,7 | 99,2—99,5 | 99,7 | 98,5 | 99,5 |
| технологического кислорода | — | — | — | — | — | — | — |
| чистого азота . . . . . | — | — | — | — | — | — | — |

* Числитель—газообразного $O_2$ в *м³/ч*, знаменатель—жидкого $O_2$ в *кг/ч*; на установке К-0,15 вместо жидкого $O_2$ можно получить 70 *кг/ч* жид-

*Продолжение*

| | Установки | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | К-0,04 (КГН-30) | УКГС-100 | К-0,15 | КГ-300М | К-0,4 | КТ-1000М | К-1,4 (БР-14) |
| Количество перерабатываемого воздуха, *м³/ч* . . . . . | 180—210 | 780 | 960 | 1800 | 2400 | 6800 | 8900 |
| Удельный расход энергии | | | | | | | |
| *квт·ч/м³* кислорода . . . . | 1,5—1,7** | 2,0** | 1,1** | 1,2—1,3** | 1,0** | 1,0** | 0,67 |
| *Мдж/м³* кислорода . . . . | 5,4—6,12 | 7,2 | 4,0 | 4,3—4,7 | 3,6 | 3,6 | 2,4 |
| Машинное оборудование воздушный компрессор . . | 2Р-3/220 | 2СГ-50 | 205ВП-16/70 или 2С5ВП-16/70 | 205ВП-30/8 и дожимающий КД-8/5-220 | 4М10-40/70 | ЦК-100-61; 5Г-14/220 | ЦК-135/8 |
| поршневой детандер . . . | — | ДСД-5 | 3аД-6/50 | ДВД-70/180 | 3аД-11/50 | ДВД-70/180 | — |
| жидкостной насос . . . . | 1НСГ-1 | — | НЖК-200/230 | — | 22НСГ-500/200; 2 шт. | — | — |
| турбодетандер . . . . . | — | — | — | — | — | — | ТДР-3-6А; ТДР-3-6Б |
| кислородный компрессор . | — | 2РК-1,5/220; 2 шт. | — | К3Р-5/165 | — | К3Р-5/165; 4 шт. | — |
| Продолжительность кампании, сутки . . . . . | 30 | 30 | 100 | 60 | 100 | 100 | 360 |

** С учетом наполнения баллонов

*Продолжение*

| | Установки | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Кт-5-2 (БР-5М) | Кт-12-2 (БР-1М) | КтК-12-1 (БР-1К) | К-11-1 (БР-1Кч) | КтКАр-12 (БР-1КАр) | КтК-35-2 (БР-2М) | КАр-30 |
| Производительность, $м^3/ч$ | | | | | | | |
| кислород технический | 150 | 300 | 3500 | 11 150*** | 3500 | 11 000*** | 30 300*** |
| кислород технологический | 5 300 | 13 000 | 9000 | — | 8500 | 24 000 | — |
| азот чистый | 400 | 500 | 500 | 1000 | 120 сырого аргона | 10 000 | 350 аргона |
| криптоно-ксеноновый концентрат (0,1—0,2%-ный Kr + Xe), в пересчете на 100%-ный продукт, $дм^3/ч$ | 20 | 55 | 55 | 50 | 55 | 215 | 168 |
| неоно-гелиевая смесь 40%-ная (Ne + He), $м^3/ч$ | — | 1,35 | 1,35 | 1,35 | — | 4,0 | 4,0 |
| Концентрация, % | | | | | | | |
| технического кислорода | 99,5 | 99,5 | 99,5 | 99,5 | 99,5 | 99,5 | 99,5**** |
| технологического кислорода | 95 | 95 | 95 | — | 98 | 95 | — |
| чистого азота | 99,98 | 99,98 | 99,98 | 99,5 | — | 99 | 99,99%-ный аргон |

*** В том числе под давлением 165 $кгс/см^2$: 150 $м^3/ч$ на установке К-11-1, 300 $м^3/ч$ на установке КАр-30 и КтК-35-2.

*Продолжение*

| | Установки | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Кт-5-2 (БР-5М) | Кт-12-2 (БР-1М) | КтК-12-1 (БР-1К) | К-11-1 (БР-1Кч) | КтКАр-12 (БР-1КАр) | КтК-35-2 (БР-2М) | КАр-30 |
| Количество перерабатываемого воздуха, $м^3/ч$ | 29 700 | 68 900 | 66 200 | 65 500 | 62 500 | 180 000 | 180 000 |
| Удельный расход энергии $квт \cdot ч/м^3$ кислорода | 0,5 | 0,43 | 0,45 | 0,53 | 0,53 | 0,4 | 0,55 |
| $Мдж/м^3$ кислорода | 1,8 | 1,55 | 1,62 | 1,91 | 1,91 | 1,44 | 1,98 |
| Машинное оборудование | | | | | | | |
| воздушный компрессор | К-500-61-1 | К-1500-62-2 | К-1500-62-2 | К-1500-62-2 | К-1500-61 | К-3000-61-1 | К-3000-61-1 |
| поршневой детандер | — | — | — | — | — | — | — |
| жидкостной насос | НЖК-200/230 | НЖК-200/230 | — | НЖК-200/230 | — | НЖК-19 | — |
| турбодетандер | РТ-10-5,3 или СБ-1409; 2 шт. | ТДР-24-5,5; 2 шт. | ТДР-24-5,5; 2 шт. | ТДР-24-5,5; 2 шт. | ТДР-19-6; 2 шт. | ТДР-42-5М или РТ-50-6; 2 шт. | РТ-50-6; 2 шт. |
| кислородный компрессор | — | — | — | — | — | — | — |
| Продолжительность кампании, сутки | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 |

Таблица 4.4. **Технические данные установок для получения газообразного и жидкого кислорода и азота**

| | Установки | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | УКА-0,11 (АжК-0,02) | СКАДС-17 | КжАж-0,04 | Кж-150 | Аж-0,25-1 (ЖА-300-2М) | ГЖА-2000М | Кж-1,6 (КЖ-1) | КжАр-1,6 (КЖ-1Ар) | АжК-1,6 (КЖГ-1) | КжААр-1,6 (КЖА-1) | Аж-1,6 (ЖА-1) |
| Производительность | | | | | | | | | | | |
| кислород газообразный, *м³/ч* | 17 | 17 | 40 | 125 | — | 400 | — | 150 | 1100 | 150 | — |
| кислород жидкий, *кг/ч* | — | — | 36 | 150 | — | — | 1600 | 1600 | — | 1200 | — |
| азот газообразный, *м³/ч* | 20 | — | 40 | — | — | 2000 | — | — | — | 5000 | 700 |
| азот жидкий, *кг/ч* | 15 | 15 | 36 | 140 | 230 | — | 1600 | 1600 | 1600 | — | 1600 |
| аргон сырой, *м³/ч* | — | — | — | — | — | — | — | 45 (92%-ный) | — | 45 (92%-ный) | — |
| Концентрация, % | | | | | | | | | | | |
| кислорода | 99,2 | 99,2 | 99,7 | 99,2 | — | 98,5 | 99,2 | 99,2 | 99,5 | 99,5 | — |
| азота | 99,9 | 99,9 | 99,5 | 99,0 | 99,0 | 99,98 | 99,5 | 99,5 | 98,0 | 99,9 | 98,0 |
| Количество перерабатываемого воздуха, *м³/ч* | 120 | 110 | 240 | 800 | 1080 | 3000 | 6740 | 6740 | 6740 | 6740 | 6740 |
| Расход энергии | | | | | | | | | | | |
| *квт·ч/м³* | 2,24* | 2,0* | 2,0* | 1,15—1,25 | — | 1,2 | — | — | — | — | — |
| *Мдж/м³* | 8,05 | 7,2 | 7,2 | 4,14—4,5 | — | 4,32 | — | — | — | — | — |
| *квт·ч/кг* | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 1,5—1,6 | 1,18 | — | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| *Мдж/кг* | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 5,4—5,76 | 4,3 | — | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 |
| Машинное оборудование | | | | | | | | | | | |
| воздушный компрессор | КВ-100У | КВ-100У | 202ВП-4/220 | 5Г-14/220 | 7ВП-20/2 | ВП50/8 ДВУ-20-6/220 | 50Т-130/220 | 50Т-130/220 | 50Т-130/220 | 50Т-130/220 | 50Т-130/220 |
| поршневой детандер | ДВД-11 | ДВД-11 | ДВД-9 | ДВД-70/180 | ДВД-80/1 | ДВД-80/180 | ДВД-6; 2 шт. | ДВД-6; 2 шт. | ДВД-6; 2 шт. | ДВД-6; 2 шт. | ДВД-6; 2 шт. |
| жидкостной насос | НЖК-11 | НЖК-4 | 1НСГ-1 или НЖА-22М-1 | — | Блок пр варительн охлажде с фреоно агрегат АК-ФК | — | — | — | — | — | — |
| Продолжительность кампании, сутки | 10 | 10 | 30 | 30 | 100 | 60 | 120—180 | 120—180 | 120—180 | 120—180 | 120—180 |

* С учетом наполнения баллонов.

Таблица 4.5. **Технические данные установок для получения газообразного чистого азота и кислорода**

| | Установки | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | АКГ-115/18 | АК-0,1 (АКГН-115/18) | АКГСН-960 | А-0,6 | АК-0,6 | АК-1,5 |
| Производительность, *м³/ч* | | | | | | |
| кислород технический | 18 | 18 | 85 | — | 85 | 215 |
| кислород технологический | — | — | — | — | — | — |
| азот чистый | 115 | 95 | 500 | 600* | 600 | 1500 |
| криптоно-ксеноновый концентрат (0,1—0,2%-ный Kr + Xe) в пересчете на 100%-ный продукт, *дм³/ч* | — | — | — | — | — | — |
| неоно-гелиевая смесь, 40%-ная (Ne + He), *м³/ч* | — | — | — | — | — | — |
| Концентрация, % | | | | | | |
| технического кислорода | 99,2 | 99,2 | 99,5 | — | 99,7 | 99,7 |
| технологического кислорода | — | — | — | — | — | — |
| чистого азота | 99,8 | 99,9 | 99,9 | 99,9995 | 99,9995 | 99,9995 |

* Установка может работать в двух режимах: I — 600 *м³/ч* азота под давлением 6 *кгс/см²*; II—500 *м³/ч* азота при 6 *кгс/см²* и 50 *м³/ч* азота



*Продолжение*

| | Установки | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | АКГ-115/18 | АК-0,1 (АКГН-115/18) | АКГСН-960 | А-0,6 | АК-0,6 | АК-1,5 |
| Количество перерабатываемого воздуха, *м³/ч* | 180 | 180 | 960 | 960 | 960 | 2400 |
| Удельный расход энергии | | | | | | |
| *квт·ч/м³* кислорода | 0,4** | 0,4** | 0,8*** | 0,32**** | 0,23—0,27**** | 0,22—0,26**** |
| *Мдж/м³* кислорода | 1,44 | 1,44 | 2,88 | 1,15 | 0,83—0,97 | 0,79—0,94 |
| Машинное оборудование | | | | | | |
| воздушный компрессор | 2Р-3/220 | 2Р-3/220 | 205 ВП-16/70 | 2С5 ВП-16/70 или 205 ВП-16/70 | 205 ВП-16/70 | 4М10-40/70 |
| поршневой детандер | — | — | ДСД-70/180 | 3аД-6/50 или КВ-1807 | 3аД-6/50 | 3аД-18/40 |
| жидкостной насос | — | 1НСГ-1 | НЖА-22М | — | НЖА-22М или 22НСГ-130/400 | НЖК-200/230 |
| турбодетандер | — | — | — | — | — | РТ-1,3/40 (вместо поршневого детандера) |
| Продолжительность кампании, сутки | 25 | 30 | 30 | 180 | 180 | 180 |

** На 1 *м³* ($O_2$+$N_2$).
*** С учетом наполнения баллонов
**** На 1 *м³* азота.

*Продолжение*

| | Установки | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | КтА-12-2 (БР-1А) | АКт-16-1 (БР-6М) | АКт-16-2 | АКт-17-1 (БР-9М) первый режим | АКт-17-1 (БР-9М) второй режим | КА-5 | КА-13,5 | А-8 |
| Производительность, $м^3/ч$ | | | | | | | | |
| кислород технический | 300 | 150 | 150 | 150 | 150 | 5 000* | 13 650* | 30 |
| кислород технологический | 13 000 | 8 850 | 8 850 | 16 000 | 16 500 | — | — | — |
| азот чистый | 3 000 | 16 000 | 16 000 | 17 000 | 24 000 | 1 500 | 3 000 | 8 000 |
| криптоно-ксеноновый концентрат (0,1—0,2%-ный Kr + Xe), в пересчете на 100%-ный продукт, $дм^3/ч$ | 55 | — | — | — | — | — | — | — |
| неоно-гелиевая смесь, 40%-ная (Ne + He), $м^3/ч$ | 1,35 | 0,4 | 0,4 | 0,7 | 0,7 | — | — | — |
| Концентрация, % | | | | | | | | |
| технического кислорода | 99,5 | 99,5 | 99,7 | 99,7 | 99,7 | 99,5 | 99,5 | 99,8 |



*Продолжение*

| | Установки | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | КтА-12-2 (БР-1А) | АКт-16-1 (БР-6М) | АКт-16-2 | АКт-17-1 (БР-9М) первый режим | АКт-17-1 (БР-9М) второй режим | КА-5 | КА-13,5 | А-8 |
| Концентрация, % | | | | | | | | |
| технологического кислорода | 95,0 | 95,0 | 95,0 | 95,0 | 95,0 | — | — | — |
| азота чистого | 99,98 | 99,998 | 99,998 | 99,998 | 99,998 | 99,85 | 99,9985 | 99,9995 |
| Количество перерабатываемого воздуха, $м^3/ч$ | 72 300 | 48 500 | 48 500 | 84 500 | 95 000 | 32 600 | 85 000 | 24 000 |
| Удельный расход энергии | | | | | | | | |
| $квт \cdot ч/м^3$ кислорода | 0,48 | 0,54 | 0,54 | 0,48 | 0,55 | 0,48 | 0,52 | 0,244* |
| $Мдж/м^3$ кислорода | 1,70 | 1,9 | 1,9 | 1,7 | 2,0 | 1,7 | 1,83 | 0,88 |
| Машинное оборудование | | | | | | | | |
| воздушный компрессор | К-1500-62-2 | К-905-61-1 | К-905-61-1 | К-1500-62-2 | | К-500-61-1 | К-1500-62-2 | К-350-62-1 |
| жидкостной насос | НЖК-19 | — | НЖК-200/230 | НЖК-200 230 | | НЖК-200, 230 | НЖК-200, 230 | 1НСГ-1 |
| турбодетандер | ТДР-24-5,5; 2 шт. | ТДР-15-5,5 или РТ-17-6; 2 шт. | ТДР-15-5,5 или РТ-17-6; 2 шт. | РТ-29-6; 2 шт. | | РТ-10-5,3; 2 шт. | РТ-29-6; 2 шт. | РТ-18-3; 2 шт. |
| Продолжительность кампании, сутки | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 |

* На 1 $м^3$ азота.

1500 $м^3/ч$, температура азота перед турбодетандерами составляет от —70 до —75 °С.

Технические характеристики некоторых отечественных воздухоразделительных установок приведены в табл. 4.3, 4.4 и 4.5*.

## 4.9. ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ЗАРУБЕЖНЫХ ФИРМ

За истекшее десятилетие производство кислорода и азота из атмосферного воздуха за рубежом неуклонно развивалось в соответствии с потребностями различных отраслей промышленности (металлургической, химической и др.).

Как уже отмечалось выше, в 1970 г. производство кислорода в капиталистических странах достигло 53 млрд. $м^3$ в год, азота — 13 млрд. $м^3$ в год. Из этого количества на долю США приходится 18 млрд. $м^3$ кислорода и 5,6 млрд. $м^3$/год азота. На втором месте по выпуску кислорода в капиталистических странах находится Япония, где в 1970 г. производство кислорода составляло около 7 млрд. $м^3$ в год.

Увеличение выпуска кислорода, азота и аргона вызвало соответствующее развитие производства воздухоразделительных установок и систем снабжения потребителей кислородом, азотом и аргоном**.

**Англия.** Основной фирмой, выпускающей воздухоразделительные установки различной производительности, предназначенные для получения кислорода различной концентрации (от 90 до 99,5%) и азота высокой чистоты (с попутным извлечением аргона и криптоно-ксенона), является «Бритиш Оксиджен Компани» (British Oxygen Co.). Эта фирма построила для металлургического завода «Стил Компани» в Уэлсе установку на 45 000 $м^3/ч$ технологического и технического кислорода.

В установках производительностью от 1500 до 10 000 $м^3/ч$ 99,5%-ного кислорода используется схема двух давлений, а в установках производительностью от 1500 до 16 000 $м^3/ч$ кислорода и более, а также в установках для получения азота высокой чистоты — схема одного низкого давления. Крупные потребители (металлургические и химические заводы) снабжаются кислородом по трубопроводу от базовой воздухоразделительной станции. Например, кислородопровод в Шеффильде и Ротерме длиной 30 *км* обслуживает 11 заводов. По этому трубопроводу в сутки подается 230 тыс. $м^3$ кислорода под давлением от 17 до 45 $кгс/см^2$. Имеющиеся реципиенты обеспечивают запас до 28 тыс. $м^3$ кислорода.

В установках применяются пластинчатые переключаемые теплообменники, цеолитовые блоки очистки и осушки воздуха, турбодетандеры с газовыми опорами, порошковая изоляция, ситчатые тарелки. Для изготовления аппаратов широко используются алюминиевые сплавы.

Технические данные установок, выпускаемых фирмой «Бритиш Оксиджен Компани», приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6. **Техническая характеристика кислородных установок «Бритиш Оксиджен Компани»** (British Oxygen Co.)

| Производительность, $м^3/ч$ (при 20 °С, 760 *мм рт. ст.*) при концентрации кислорода | | | Удельный расход энергии, $квт \cdot ч/м^3$ (в пересчете на 100%-ный кислород при 20 °С и 760 *мм рт. ст.*) Кислород выдается при давлении 250 *мм рт. ст.* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | установки с регенераторами при концентрации кислорода | | установки с пластинчатыми теплообменниками при концентрации кислорода | |
| 90% | 95% | 99,5% | 95,0% | 99,5% | 95,0% | 99,5% |
| — | 1 650 | 1 600 | 0,515 | 0,630 | 0,445 | 0,490 |
| — | 2 350 | 2 250 | 0,473 | 0,555 | 0,425 | 0,467 |
| — | 3 350 | 3 200 | 0,443 | 0,505 | 0,415 | 0,453 |
| — | 5 000 | 4 800 | 0,415 | 0,478 | 0,403 | 0,438 |
| — | 6 700 | 6 400 | 0,400 | 0,457 | 0,390 | 0,425 |
| — | 9 200 | 8 800 | 0,388 | 0,437 | 0,382 | 0,415 |
| — | 10 850 | 10 400 | 0,383 | 0,433 | 0,378 | 0,410 |
| 14 000 | 13 400 | 12 800 | 0,377 | 0,423 | 0,373 | 0,405 |
| 17 600 | 16 700 | 16 000 | 0,373 | 0,417 | 0,368 | 0,398 |
| 26 500 | 25 000 | 24 000 | — | 0,415 | — | 0,396 |
| 35 300 | 33 500 | 32 000 | — | 0,415 | — | 0,396 |

Установки производительностью до 8800 $м^3/ч$ 99,5%-ного кислорода (см. табл. 4.6) могут работать в двух режимах. При работе по первому режиму весь кислород получается под давлением 40 $кгс/см^2$; в установке применяется кислородный насос. Если установка работает по второму режиму, 85% кислорода получается в виде газа под давлением 40 $кгс/см^2$ (используется кислородный насос) и 15% — в виде жидкости. Расход энергии составляет:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Производительность установки, $м^3/ч$ | 1600 | 2250 | 3200 | 4800 | 6400 | 8800 |
| Расход энергии на сжатие кислорода насосом, $квт \cdot ч/м^3$ | 0,347 | 0,306 | 0,270 | 0,277 | 0,270 | 0,270 |
| Удельный расход энергии на получение жидкого кислорода | | | | | | |
| $квт \cdot ч/м^3$ | 1,28 | 1,13 | 1,13 | 1,09 | 1,07 | 1,02 |
| $квт \cdot ч/кг$ | 0,965 | 0,85 | 0,85 | 0,82 | 0,81 | 0,77 |

* Указанная в таблицах производительность установок может несколько изменяться в сторону повышения в зависимости от принятых проектных решений, конструктивных изменений аппаратов и схем, использования внутренних резервов оборудования и т. п.

При получении на установках технического кислорода повышенной концентрации (99,7% $O_2$) по ГОСТ 5583—68 приведенная в таблицах производительность снижается на 8—10% при сохранении остальных показателей неизменными.

** И. С. Гузман, В. Я. Кострицкий, Кислородное машиностроение за рубежом, ЦИНТИхимнефтемаш, 1970.

Установки низкого давления производительностью 11 700 *м³/ч* чистого азота и 9500 *м³/ч* технологического кислорода по схеме американской фирмы «Хайдрокарбон Рисерч» выпускались в Англии фирмой «Констрактор Джон Браун» (Constructor John Brown). Для изготовления аппаратов и трубопроводов, работающих при низкой температуре, применяются нержавеющая сталь и алюминиевые сплавы. Длительность работы блока разделения воздуха без отогрева — до 2,5 лет. Эти установки можно размещать вне здания.

**Франция.** Ведущей фирмой по производству воздухоразделительных установок является «Лэр Ликид» (Láir Liquide)*. Эта фирма выпускает крупные установки производительностью до 32 000 *м³/ч* кислорода, а также установки на 15 000 *м³/ч* газообразного и 6000 *м³/ч* жидкого кислорода или азота, используемые для снабжения металлургических заводов продуктами разделения воздуха. Разрабатываются установки на 45 000, 50 000 и 70 000 *м³/ч* кислорода. Ранее использовавшаяся фирмой схема «Окситон», включающая регенераторы типа «Линде-Френкель» и три ректификационные колонны, работающие при избыточном давлении 5,5; 2,8 и 1,3 *кгс/см²*, подвергалась за последние годы ряду изменений. В частности, регенераторы были заменены пластинчатыми теплообменниками из алюминиевого сплава АМц (до 1,6% Mn). Габариты этих теплообменников в 3—4 раза меньше, чем у регенераторов.

Применяется централизованное снабжение потребителей газообразным кислородом и азотом по трубопроводу. Жидкий кислород накапливается в хранилищах емкостью по 850—1000 *м³*, снабженных насосами и установками для газификации. Запас жидкого кислорода в хранилищах объемом 3000 *м³* обеспечивает резерв потребления на 80 суток. Общее число потребителей жидкого кислорода и жидкого азота более 100.

Диаметры трубопроводов для азота до 150 *мм*, длина от 5 до 55 *км*. Диаметры трубопроводов для кислорода 150—350 *мм*, протяженность распределительной сети до 240 *км*.

Запроектировано строительство кислородопровода длиной 300 *км* между заводами Лотарингии (Франция), Саара (ФРГ) и Люксембурга для снабжения потребителей кислородом от воздухоразделительной станции общей производительностью 40 000 *м³/ч* кислорода.

**Федеративная Республика Германии (ФРГ).** Фирма «Линде Айзмашинен» (Gesellschaft für Linde's Eismaschinen) выпускает установки высокого, среднего и низкого давления всех типов для производства кислорода, азота и редких газов. В крупных установках используется схема низкого давления с отбором части воздуха из середины регенераторов для подачи в адсорбер очистки от $CO_2$ и с последующим направлением воздуха в турбодетандер, а затем — в верхнюю колонну.

* Фирма имеет свои филиалы в Италии, Бельгии, Японии и Канаде.



Для предприятий с повышенной загрязненностью воздуха выпускаются установки с газовым адсорбером на потоке воздуха после регенераторов и адсорбционной очисткой в циркуляционном контуре жидкого кислорода (перекачиваемого насосом) из основных конденсаторов. Проточность основного конденсатора-испарителя обеспечена непрерывным отбором из него около 1% вырабатываемого кислорода. Ниже приводятся технические характеристики крупных установок фирмы «Линде»:

| Тип установки | I | II | III | IV | V | VI |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Производительность, *м³/ч* (при 0 °С, 760 *мм рт. ст.*) | | | | | | |
| кислород | 5000 | 6000 | 7000 | 8000 | 9000 | 10000 |
| азот | 4200 | — | 8000 | 2000 | 5000 | 18000 |
| Концентрация кислорода, % | 99,5 | 99,5 | 98 | 95 | 99,5 | 99,5 |
| Избыточное давление на выходе из блока, *кгс/см²* | | | | | | |
| кислорода | 20 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| азота | 0,3 | — | 0,3 | 0,3 | 4 | 0,3 |
| Расход энергии, *квт·ч/м³* кислорода | 0,68 | 0,59 | 0,59 | 0,6 | 0,6 | 0,7 |

| Тип установки | VII | VIII | IX | X | XI |
|---|---|---|---|---|---|
| Производительность, *м³/ч* (при 0 °С, 760 *мм рт. ст.*) | | | | | |
| кислород | 12000 | 14000 | 16000 | 20000 | 22400 |
| азот | 11000 | — | 5000 | — | 2650 (99,7%-ного) |
| Концентрация кислорода, % | 98—99,5 | 99,5 | 98 | 95 | 98 |
| Избыточное давление на выходе из блока, *кгс/см²* | | | | | |
| кислорода | 30 | 30 | 30 | 40 | 4 |
| азота | 0,3 | — | 4 | — | 5,5 |
| Расход энергии, *квт·ч/м³* кислорода | 0,65 | 0,6 | 0,6 | 0,67 | — |

Установки с регенераторами, заполненными насыпной базальтовой насадкой, снабжены змеевиками для вывода чистых продуктов и могут вырабатывать 99,998%-ный азот. Установки типа VI могут производить аргон в количестве 170 *м³/ч* сырого аргона, содержащего 2% кислорода и 2% азота. Эти установки имеют шесть регенераторов с периодом переключения 4 *мин*. Параллельно работают по три регенератора (1—3—5 и 2—4—6). Конденсатор имеет пластинчатую конструкцию. Часть жидкого кислорода из конденсатора непрерывно отбирается насосом и направляется в адсорбер для очистки от ацетилена, а затем подается обратно в конденсатор. Кроме колонны для получения сырого аргона установка имеет также колонну для извлечения криптоно-ксенонового концентрата. Поддержание заданного температурного режима регенераторов, уровня жидкости в нижней колонне и в испарителе криптоно-ксенона, уровня воды в азотном и воздушном скрубберах системы азотно-водяного охлаждения осуществляется автоматически. Производительность турбодетандеров можно уменьшать на 10, 20, 30

и 40% от максимальной выключением сопел направляющего аппарата. Для сжатия кислорода используется турбокомпрессор производительностью 12000 *м³/ч* на давление 6,5 *кгс/см²*, а для последующего дожатия с 6,5 до 30 *кгс/см²* — поршневой двухступенчатый компрессор на 10000 *м³/ч* (300 *об/мин*) без смазки цилиндров.

Фирма «Мессер-Грисгейм» (Messer-Griesheim) производит также крупные воздухоразделительные установки, работающие по схеме низкого давления с азотным циклом. Ниже приводятся технические данные установок ДР и ДК:

| | Установки типа ДР | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Производительность по кислороду, *м³/ч* | 5000 | 6000 | 7000 | 8000 | 12000 |
| Концентрация кислорода, % | 99,5 | 99,5 | 99,5 | 99,7 | 99,7 |
| Количество перерабатываемого воздуха, *м³/ч* | 26800 | 32300 | 37400 | 42800 | — |
| Расход энергии (с учетом сжатия кислорода до избыточного давления 30 *кгс/см²*), *квт·ч/м³* кислорода | 0,69 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | — |

Установка на 12000 *м³/ч* кислорода одновременно дает 12000 *м³/ч* азота 99,999%-ной концентрации. Часть продукта (4000 *м³/ч*) получают в жидком виде.

| | Установки типа ДК | | | |
|---|---|---|---|---|
| Производительность по кислороду, *м³/ч* | | | | |
| 99,5%-ного | 5000 | 6000 | 7000 | 8000 |
| 98,0%-ного | 5400 | 6940 | 7560 | 8650 |
| 95,0%-ного | 5860 | 7000 | 8190 | 9350 |
| Количество перерабатываемого воздуха, *м³/ч* | 29300 | 34500 | 40600 | 46300 |
| Расход энергии (без сжатия кислорода), *квт·ч/м³*, при концентрации кислорода | | | | |
| 99,5% | 0,45 | 0,44 | 0,43 | 0,43 |
| 98,0% | 0,41 | 0,40 | 0,40 | 0,39 |
| 95,0% | 0,37 | 0,36 | 0,36 | 0,35 |

Для изготовления аппаратов установок фирмы «Мессер-Грисгейм» используются алюминиевые сплавы типа Амц. Вместо регенераторов применяются пластинчатые переключаемые теплообменники из сплава Амц. Чистый азот получают в колонне высокого давления (4,5—5 *кгс/см²*, избыточное) и отводят его из конденсатора колонны в жидком виде. Остальной жидкий азот используется в качестве азотной флегмы для колонны низкого давления. Продукты разделения очищаются от ацетилена в адсорберах, расположенных на линии поступления кубовой жидкости из колонны высокого давления в верхнюю колонну.

Для азотного цикла используется часть чистого азота из колонны высокого давления. Азотный цикл, позволяющий получать часть продукта в жидком виде, имеет азотный компрессор, пластинчатые теплообменники и два турбодетандера, включенные по



следовательно. Часть азота цикла после теплообменников выводится из установки в виде готового продукта — чистого газообразного азота. Жидкий кислород (продукт) получают из нижнего сборника колонны низкого давления. Газообразный кислород и отходящий (грязный) азот отводят после переключаемых теплообменников в газгольдер и затем сжимают компрессорами до давления, требующегося потребителю.

Фирма «Мессер-Грисгейм» выпускает установки производительностью до 40000 *м³/ч* кислорода, а также установки высокого и среднего давления, вырабатывающие от 100 до 3000 *м³/ч* кислорода 99,7%-ной концентрации.

**Италия.** В этой стране 80% получаемого кислорода используется в химической промышленности. Воздухоразделительные установки производит фирма «Ривойра Торино» (Esercizio Industrie Rivoira Torino S. p. a.). Характеристика этих установок приведена ниже:

| | Производительность, *м³/ч* | Концентрация, % |
|---|---|---|
| Установки высокого давления | | |
| однократной ректификации для получения газообразного кислорода (под давлением 200 *кгс/см²*) | по *К* 7—30 | *К* 99,7 |
| двукратной ректификации, для получения жидкого и газообразного кислорода (под давлением 200 *кгс/см²*) | по *К* 35—200 | *А* 99,7 |
| с поршневым детандером | | |
| для получения жидких и газообразных кислорода и азота | по *К* 50—1000<br>по *А* 62—1230 | *К* 99,7<br>*А* 99,999 |
| для получения жидкого и газообразного кислорода и жидкого аргона | по *К* 250—1000<br>по *Ар.* 7,5—30 | *К* 99,7<br>*А* 99,999 |
| для получения жидкого и газообразного кислорода, жидкого азота, жидкого аргона | по *К* 230—925<br>по *А* 50—200<br>по *Ар.* 6,5—26 | *К* 99,7<br>*А* 99,999<br>*Ар.* 99,999 |
| для получения чистого азота | по *А* 13—150 | *А* 99,9995 |
| Установки среднего давления с турбодетандером | по *К* 130—950 | *К* 99,7 |
| Установки низкого давления | | |
| для получения газообразного кислорода (сжимается кислородным компрессором) | по *К* 1000—8000 | *К* 99,5 |
| для получения газообразного и жидкого кислорода (используются азотный холодильный цикл и жидкостной насос) | по *К* 1000 до 8000 | *К* 99,5 |

Условные обозначения: *К*—кислород; *А*—азот; *Ар.*—аргон.

В установках производительностью выше 30 *м³/ч* применяется двукратная ректификация, в установках высокого давления — очистка и осушка воздуха цеолитами. Установки в высокой степени автоматизированы. Удельный расход энергии на установках высокого, среднего и низкого давления составляет соответственно 1,29—1,6; 0,92—1 и 0,62—0,68 *квт·ч/м³* кислорода. Для установок высокого давления в расход энергии включены затраты на сжатие кислорода

в насосе до 200 *кгс/см²*. В установках среднего давления на сжатие кислорода в компрессоре требуется дополнительно 0,28—0,3 *квт·ч/м³* кислорода. Избыточное давление воздуха в цикле высокого давления равно 90—150, среднего — 54—57, низкого — 11—15 *кгс/см²*.

**США.** Основными фирмами, выпускающими воздухоразделительные установки большой производительности, являются «Линде» (Linde Co Division of Union Carbide), «Эйр Ридакшен» (Air Reduction), «Эйр Продактс» (Air Products), «Америкен Мессер» (American Messer), Америкен Эйр Ликид» (American Air Liquid), «Хайдрокарбон Рисерч» (Hydrocarbon Research Inc.). Мелкие установки для получения технического кислорода выпускает фирма «Сапириор Эйр Продактс» (Superior Air Products Co.).

Фирма «Линде» изготовляет крупные установки (работающие по циклу одного низкого давления) для металлургической и химической промышленности. Схема установок подобна схеме установок «Линде», выпускаемых в ФРГ. Производительность установок до 51 000 *м³/ч* кислорода. Выпускаются установки для получения чистого азота, а также установки для получения до 5000 *кг/ч* жидкого кислорода. Крупные установки снабжаются дополнительным оборудованием для попутного извлечения аргона, криптона и ксенона.

Фирма «Линде» осуществляет централизованное снабжение крупных потребителей газообразным кислородом по трубопроводам и жидким кислородом в цистернах от районных заводов и станций.

Установки фирмы «Эйр Ридакшен» аналогичны установкам, выпускаемым французской фирмой «Лэр Ликид», и предназначены для получения технического и технологического кислорода. Наибольшая производительность установок 20 000 *м³/ч* кислорода. Мощность установок жидкого кислорода до 1200 *кг/ч*.

«Эйр Продактс» поставляет установки для получения технического и технологического газообразного кислорода, а также установки для получения жидкого кислорода. В этих установках используется цикл низкого давления и цикл низкого давления с циркуляцией азота. Вместо регенераторов применяются пластинчатые теплообменники. Производительность установок достигает 36 000 *м³/ч* газообразного и 7000 *кг/ч* жидкого кислорода. Эта фирма также поставляет жидкий кислород крупным и мелким потребителям.

Фирма «Хайдрокарбон Рисерч» строит установки производительностью до 29 000 *м³/ч* кислорода, предназначенные для химических предприятий фирмы. Установки работают по схеме низкого давления с использованием реверсивных пластинчатых теплообменников из алюминиевого сплава. Эти же сплавы используются для изготовления других низкотемпературных аппаратов. Разработаны установки с реверсивными теплообменниками различной производительности для получения жидкого и газообразного кислорода, работающие по циклам высокого, среднего и низкого давлений. Ряд установок имеет дополнительные колонны для получения аргона и криптоно-ксенонового концентрата.



**Япония.** Ведущей является фирма «Кобе Стил» (Kobe Steel Works Ltd.), выпускающая установки производительностью от 500 до 35 000 *м³/ч* кислорода 98—99,8%-ной концентрации. Технические данные наиболее крупных установок, вырабатывающих 99,5%-ный кислород, следующие:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Тип установки | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 |
| Производительность, *м³/ч* | 15 000* | 20 000 | 25 000 | 30 000 | 35 000 |
| Количество перерабатываемого воздуха, *м³/ч* | 84 000 | 112 000 | 140 000 | 168 000 | 196 000 |
| Избыточное давление, *кгс/см²* | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 5,0 | 5,0 |
| Расход энергии, *квт·ч/м³* | 0,496 | 0,495 | 0,495 | 0,499 | 0,499 |

* При получении 95%-ного кислорода производительность установки составляет 17 500 *м³/ч*.

В установках «Кобе Стил» используются цикл низкого давления, насыпные регенераторы (базальт) со встроенными змеевиками для чистых продуктов*. Разделительный аппарат имеет три ректификационные колонны (схема «Оксетон» фирмы «Лер Ликид»). Блок разделения может устанавливаться вне здания. Число регенераторов шесть (три пары). Через змеевики первой пары выводятся технический и технологический кислород, через змеевики второй — чистый азот низкого давления и технологический кислород, через змеевики третьей пары — азот под давлением и чистый азот низкого давления. По насадке идет обратный поток отбросного азота. Переключение регенераторов происходит через 2 *мин*. Воздух в турбодетандеры (10—15%) отбирается из середины регенераторов, поступает в силикагелевые адсорберы, где очищается от $CO_2$, и после смешения с частью воздуха из нижней колонны, пройдя турбодетандеры, поступает в середину колонны низкого давления.

В установках фирмы «Кобе Стил» используются три турбодетандера — один пусковой и два рабочих, включаемые поочередно. При пуске работают все три турбодетандера. Имеется дополнительная колонна высокого давления (6 *кгс/см²*) для получения 1000 *м³/ч* чистого 99,998%-ного азота и дополнительная колонна для получения 200 *м³/ч* технического 99,5%-ного кислорода. Поддержание температурного режима регенераторов, постоянства весового количества воздуха, поступающего в блок, и постоянства уровня жидкости в нижней колонне осуществляется автоматически. Турбодетандеры имеют защиту от «разноса» при падении напряжения в электросети торможения.

Фирма «Хитачи» выпускает установки производительностью до 5000 *м³/ч* кислорода, работающие по циклам низкого, среднего и двух давлений. Фирма «Империал Оксиджен» выпускает установки по лицензиям французской фирмы «Лэр Ликид» производительностью до 14 000 *м³/ч* газообразного и до 7000 *кг/ч* жидкого кис-

* См. также сноску в разд. 4.7.1.

лорода. Фирма «Nippon Sanso» поставляет установки для получения 35 000 $м^3/ч$ 99,6%-ного газообразного кислорода, а также установки на 11 500 *кг/ч* 99,8%-ного жидкого кислорода. Одновременно на этих установках получают чистый азот и аргон концентрации 99,999%. Фирмой запроектированы установки производительностью 50 000 $м^3/ч$ газообразного технического кислорода.

## 4.10. УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕДКИХ ГАЗОВ

Содержащиеся в воздухе редкие газы распределяются в воздухоразделительном аппарате двойной ректификации соответственно их температурам кипения при тех давлениях, которые существуют в различных частях разделительного аппарата. На рис. 4.49 при-

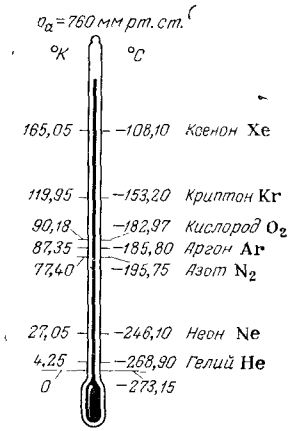



Рис. 4.49. Температуры кипения редких газов.

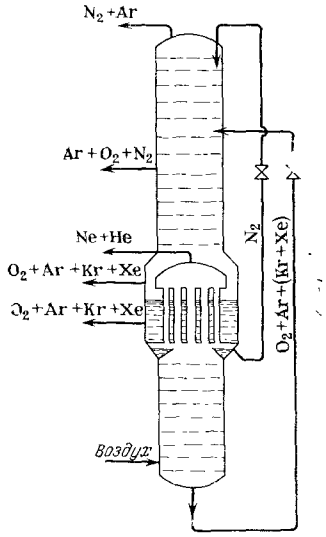



Рис. 4.50. Схема распределения газов в колонне двукратной ректификации.

ведены температуры кипения редких газов при абсолютном давлении 760 *мм рт. ст.*, а на рис. 4.50 — схема распределения газов в колонне двойной ректификации. Как видно из этих рисунков, неон и гелий, имеющие наиболее низкие температуры сжижения, накапливаются в газообразном состоянии под крышкой конденсатора. Криптон и ксенон, вследствие того что их температуры кипения выше, чем у кислорода, собираются в кубовой жидкости и вместе с нею переходят в жидкий и газообразный кислород конденсатора. Аргон, температура кипения которого лежит между



температурами кипения кислорода и азота, распределяется между этими газами, отводимыми из аппарата в качестве основных продуктов разделения воздуха.

Количество редкого газа, которое может быть получено на установке, можно приближенно определить по формуле

$$V = B \cdot c_и \cdot k \cdot 10^{-2}$$

где $V$ — количество редкого газа при 0 °C, 760 *мм рт. ст.*, $м^3/ч$;
$B$ — количество перерабатываемого в установке воздуха при 0 °C, 760 *мм рт. ст.*, $м^3/ч$;
$c_и$ — содержание редкого газа в воздухе, %;
$k$ — коэффициент извлечения редкого газа.

Для ориентировочных подсчетов принимают следующие значения $k$:

| | |
|---|---|
| Сырой аргон на установках | |
| двух давлений | 0,5—0,55 |
| высокого давления | 0,7—0,8 |
| Чистый (99,9%-ный) аргон | 0,85 |
| Криптоновый концентрат | 0,7—0,8 |
| Криптон | 0,55—0,6 |
| Ксенон | 0,35 |
| Неоно-гелиево-азотная смесь | 0,6 |
| Неон и гелий | 0,5 |

### 4.10.1. Получение аргона

Аргон является наиболее дешевым инертным газом, так как содержится в воздухе в значительно большем количестве, чем остальные редкие газы. Поэтому получение аргона на воздухоразделительных аппаратах непрерывно увеличивается; мировое производство аргона исчисляется десятками миллионов кубических метров в год. Например, только в США выпуск аргона превышает 45 млн. $м^3$ в год*. Аргон применяют как инертный газ, защищающий расплавленный металл от окисления при дуговой сварке нержавеющих сталей и легких сплавов (титана, магния, алюминия и др.), при плазменно-дуговой резке легированных сталей, алюминия, магния, меди и др., для создания инертной среды при промышленном получении чистых титана, циркония, ниобия, молибдена, а также в химической и других отраслях промышленности (в электроламповой для изготовления ламп накаливания, люминесцентных и газосветных трубок, в радиоэлектронной и др.).

Аргон применяют также для продувки жидкой стали в ковше с целью удаления из нее вредных примесей и растворенных газов, а также при плавке и разливке стали в инертной среде (аргоне). При необходимости крупным потребителям аргон доставляется в жидком виде. При этом используются емкости и газификаторы, аналогичные применяемым для жидкого кислорода.

* В США на установках разделения воздуха получают только около 5% общего количества аргона. Остальной аргон добывается из продувочных газов процесса производства синтетического аммиака.

Технологический процесс производства чистого аргона включает три стадии. На первой стадии в воздухоразделительном аппарате попутно с кислородом или азотом получают азото-аргоно-кислородную смесь, так называемый сырой аргон, содержащий 82—90% аргона, 4—8% азота и 1—10% кислорода.

На второй стадии эту смесь подвергают каталитической очистке от кислорода при связывании последнего водородом с получением смеси азот — аргон. Третья стадия заключается в разделении смеси азот — аргон на чистый аргон, извлекаемый как конечный продукт, и азот, выбрасываемый в атмосферу.

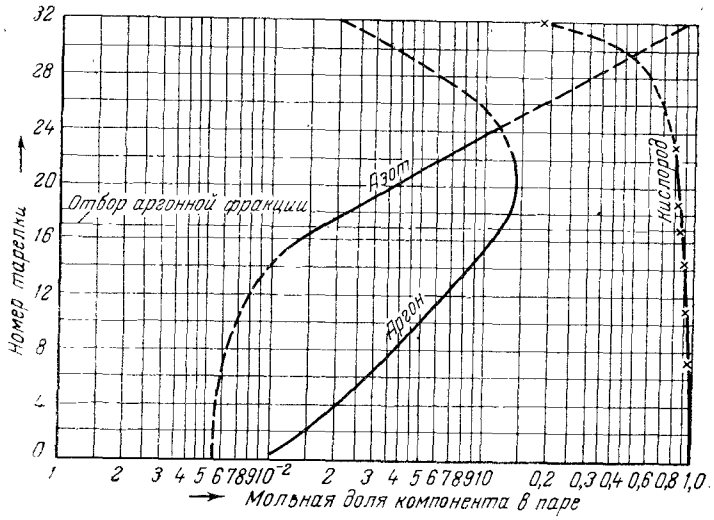



Рис. 4.51. Концентрация кислорода, аргона и азота в парах на тарелках верхней ректификационной колонны кислородно-аргонного аппарата (по данным И. П. Ишкина).

**Получение сырого аргона.** Как уже указывалось, аргон, температура кипения которого находится между температурами кипения кислорода и азота, в процессе ректификации воздуха распределяется по высоте колонны между азотом и кислородом, частично смешиваясь с каждым из них.

В аппаратах для получения кислорода, работающих без отбора аргонной фракции, содержание аргона в кислороде составляет 0,3—0,6%, а в азоте 1—1,1%.

В аппаратах для производства чистого азота примесь аргона в получаемом кислороде достигает 3,6%, а в азоте 0,15% и менее.

В аппаратах двукратной ректификации основное количество аргона накапливается на тарелках верхней колонны, расположенных несколько ниже места ввода обогащенной кислородом жидкости из куба нижней колонны.



Распределение аргона по тарелкам верхней колонны зависит от типа аппарата и условий его работы. Из графика (рис. 4.51), характеризующего работу кислородно-аргонного аппарата при получении газообразного кислорода, видно, что больше всего аргона содержится в парах между 18-й и 22-й тарелками верхней колонны. Отбор аргонной фракции при этом производился с 17-й тарелки (считая от конденсатора).

Схема кислородно-аргонного аппарата установки для получения жидкого кислорода приведена на рис. 4.52. Верхняя ректификационная колонна имеет 46—48 тарелок, а аргонная 46—60. Парообразная аргонная фракция, содержащая 7—10% аргона и не более 1% азота, отбирается с 17—19-й тарелок основной колонны *3* и подается в нижнюю часть дополнительной аргонной колонны *6* с конденсатором *5*, расположенным в верхней части. В верхней колонне предусмотрено несколько мест отбора аргонной фракции (с нескольких тарелок) с тем, чтобы можно было подобрать оптимальный состав аргонной фракции, при котором аргонная колонна работает наиболее устойчиво и с наибольшим извлечением аргона.

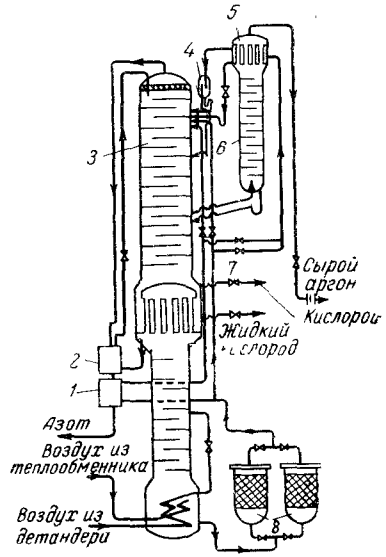



Рис. 4.52. Схема кислородно-аргонного аппарата:

*1*, *2* — переохладители кубовой жидкости и азотной флегмы; *3* — основная колонна; *4* — отделитель жидкости; *5* — конденсатор аргонной колонны; *6* — аргонная колонна; *7* — вентиль отбора газообразного кислорода для регулирования состава аргонной фракции; *8* — адсорберы ацетилена.

В межтрубное пространство конденсатора *5* под избыточным давлением 0,5 *кгс/см*² подается кубовая жидкость из испарителя нижней ректификационной колонны через соответствующий расширительный вентиль и адсорберы ацетилена *8*. Эта жидкость имеет более низкую температуру, чем пары, поступающие в конденсатор из аргонной колонны. Поэтому пары частично конденсируются в трубках конденсатора, а образующаяся при этом жидкость стекает вниз и используется в процессе ректификации аргонной фракции в колонне *6*. Из верхней части аргонной колонны отводится аргоно-кислородно-азотная смесь (сырой аргон) следующего состава: 82—90% аргона, 1—10% кислорода и 4—8% азота. Жидкость из межтрубного пространства конденсатора *5* через U-образную трубу (гидравлический затвор, облегчающий регулирование слива жидкости) и пары из конденсатора *5* выводятся на соответствующие (по составам жидкости и пара) тарелки основной колонны. Жидкость, собирающаяся в нижней части аргонной колон-

ны, освобожденная от значительной части аргона, стекает через U-образный гидравлический затвор в основную колонну на одну две тарелки ниже места отбора аргонной фракции.

На трубе отвода паров из конденсатора *5* установлен отделитель жидкости *4* для сепарации капель жидкости; через U-образный затвор эта жидкость также поступает на 29—31-ю тарелки колонны *3*. Число тарелок верхних колонн в аппаратах, где одновременно с кислородом из воздуха извлекается и аргон, увеличивается до 48 с тем, чтобы расширить зону наивыгодного состава аргонной фракции и обеспечить наиболее устойчивый режим извлечения аргона. Кубовую жидкость вводят на 24—32-ю тарелки, считая от конденсатора.

Изменение материальных потоков в ректификационном аппарате, вызванное колебанием подачи воздуха, регулированием холодопроизводительности детандера и отбора газообразных кислорода и азота, а также другими причинами, нарушает распределение аргона по тарелкам основной колонны, а также процесс его извлечения.

Так как для извлечения аргона расходуется часть флегмы основного аппарата, процесс ректификации в нем несколько ухудшается; поэтому концентрация получаемого кислорода при одновременном отборе сырого аргона снижается на 0,3—0,5% по сравнению с концентрацией кислорода без извлечения аргона.

Содержание азота в парах, отбираемых из основной колонны аргонной фракции, должно быть в 5—8 раз ниже, чем содержание в них аргона. При более высокой концентрации азота в этих парах содержание его в сыром аргоне становится выше 20%. В этих условиях аргонная колонна работает неустойчиво, так как температурный напор в ее конденсаторе уменьшается. При дальнейшем повышении содержания азота в сыром аргоне конденсация паров в трубках конденсатора *5* может совершенно прекратиться, и работа аргонной колонны станет невозможной из-за отсутствия в ней флегмы. Поэтому нежелательно перемещать вверх по основной колонне место отбора аргонной фракции, так как это связано с увеличением содержания азота во фракции. При понижении же места отбора аргонной фракции в основной колонне возрастает содержание кислорода в сыром аргоне.

Для упрощения процесса последующей очистки сырого аргона стремятся получить сырой аргон с наименьшим содержанием кислорода и азота при условии сохранения высокого значения коэффициента извлечения аргона из воздуха. При правильном ведении процесса можно достичь коэффициента извлечения аргона 0,8 при содержании кислорода в сыром аргоне не более 1—2%.

**Получение технического и чистого аргона.** Сырой аргон из аргонной колонны отводится через теплообменник в газгольдер, а затем подвергается очистке от кислорода и азота. Очистку от кислорода проводят в контактных печах, заполненных палладиевым катализатором. Через печи пропускается смесь водорода и сырого



аргона. Водород, окисляясь кислородом, содержащимся в сыром аргоне, образует водяные пары, которые затем удаляют из очищаемого газа. После очистки получают технический аргон, содержащий 84—88% аргона, 12—16% азота и следы (0,001—0,01%) кислорода.

Дальнейшая очистка технического аргона от азота производится дополнительной ректификацией в специальной колонне.

Схема установки УТА-5А для очистки сырого аргона от кислорода показана на рис. 4.53.

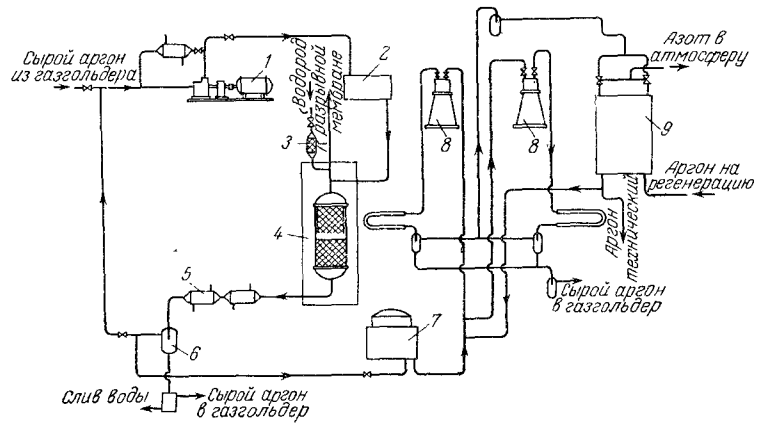



Рис. 4.53. Схема установки УТА-5А для очистки аргона от кислорода:

*1* — газодувка; *2* — подогреватель аргона (пусковой); *3* — пламегаситель; *4* — реактор каталитической очистки; *5* — холодильник; *6* — влагоотделитель; *7* — газгольдер для очищенного аргона; *8* — компрессоры; *9* — блок осушки.

Сырой аргон поступает от нескольких установок в мокрый газгольдер, где его состав усредняется. Из газгольдера аргон засасывается газодувкой *1* и после смешивания с заданным количеством очищенного аргона (таким, чтобы количество кислорода в аргоне после газодувки не превышало 2%) поступает через пусковой подогреватель *2* в реактор каталитической очистки *4*, снабженный пламегасителем *3*. Количество газа, проходящее в циркуляционной линии установки, регулируется байпасным трубопроводом, соединяющим всасывающую и нагнетательную линии газодувки.

Реактор заполнен палладиевым катализатором (ВТУ ЕУ-244—62). Палладий нанесен на активную окись алюминия. Для того чтобы температура в слое катализатора не превышала допустимую (500—550 °С), содержание кислорода в поступающем на очистку аргоне не должно превышать 2—2,3%. Смесь водорода с кислородом становится взрывоопасной при содержании водорода от 4,65 до 94%, а с воздухом — при содержании $H_2$ от 4,0 до 74%.

Пусковой подогреватель включается лишь в период пуска уста-
новки для нагрева катализатора (до 100 °С), а также используется
для сушки катализатора в случае его увлажнения. В нормальных
условиях работы газ, поступающий в контактный аппарат в ре-
зультате сжатия в газодувке, нагрет до 60—70 °С.

Реакция взаимодействия кислорода с водородом на катализа-
торе протекает при 100—140 °С (нормально при 110—150 °С).

Очищаемый аргон подается в верхнюю часть контактного аппа-
рата, куда поступает также и водород.

Очищенный от кислорода аргон, содержащий водяные пары,
проходит холодильник *5* и влагоотделитель *6*, где удаляется ка-
пельная влага. После этого основная масса газа возвращается в
всасывающую линию газодувки, а небольшая часть, соответствую-
щая производительности установки, отводится в газгольдер *7* тех-
нического аргона. Из газгольдера технический аргон засасывается
компрессором *8*, сжимается до избыточного давления 165 *кгс/см²*
и, пройдя блок осушки *9*, поступает в реципиенты *10*, откуда отби-
рается в блок разделения для очистки от азота и водорода.

Блок осушки заполнен активной окисью алюминия, регенерация
которой производится азотом, нагретым до 200—220 °С. Для уда-
ления азота после регенерации блок продувается техническим ар-
гоном, который затем сбрасывается в газгольдер сырого аргона.
Туда же сбрасываются газы после продувки влагоотделителей ком-
прессора и контактного аппарата.

Водород может подаваться из баллонов или непосредственно
из электролитической установки. На линии подачи водорода перед
входом в контактный аппарат установлен пламегаситель *3*, пред-
преждающий проскок пламени в водородную линию в случае
вспышки в аппарате. Подача водорода в контактный аппарат ре-
гулируется автоматически с помощью редуктора или пневматиче-
ским клапаном, который управляется информирующими сигнала-
ми, получаемыми от газоанализатора, указывающего содержание
водорода в техническом аргоне.

Из реципиентов *10* смесь аргона с азотом через редукционный
вентиль и теплообменник поступает под избыточным давлением
1,5—2 *кгс/см²* в дополнительную ректификационную колонну от
новного блока для разделения на чистый аргон и азот.

Для очистки аргона от кислорода пригоден только водород марки А по ГОСТ 3022—70 (электролитический). Водород марки Б (получаемый железопаровым способом) и водород марок В и Г (получаемый электролизом хлористых солей) применять нельзя ввиду возможного загрязнения аргона углеводородами и порчи катализатора.

Водород марки А должен удовлетворять следующим требованиям:

| | |
|---|---|
| Содержание, % | |
| водорода, не менее | 99,8 |
| кислорода, не более | 0,2 |
| щелочи, масла | 0 |
| Содержание воды, *г/м³*, не более | |
| в несжатом водороде | 2 |
| в сжатом | [illegible] |



Водород поставляется в баллонах по ГОСТ 949—57 под избыточным давлением 159—200 *кгс/см²*. Каждая партия сопровождается документом, удостоверяющим качество водорода и соответствие его требованиям ГОСТ. Баллоны с водородом могут доставляться в специальных контейнерах, соединенные трубками в группы по 36 баллонов, имеющих общий коллектор. Контейнер снимается с автомашины краном грузоподъемностью 3 *Т*.

**Техническая характеристика установки УТА-5А**

| | |
|---|---|
| Количество перерабатываемого аргона (в *м³/ч*), содержащего кислорода | |
| 17% | 50 |
| 12% | 70 |
| 5% | 170 |
| Максимальное количество связываемого кислорода, *м³/ч* | 8,5 |
| Расход водорода, *м³/ч* | 17,1 |
| Содержание примесей в очищенном аргоне | |
| кислорода | 0,003 |
| водорода | 0,5 |
| Производительность циркуляционной газодувки, *м³/ч* | 1000 |
| Избыточное давление очищенного аргона, *кгс/см²* | 50—165 |
| Продолжительность пускового периода, *ч* | 1 |

Для очистки технического аргона от азота применяется также специальная установка БРА-2, схема которой дана на рис. 4.54. Эта установка работает по циклу высокого давления с использованием холодильного эффекта дросселирования воздуха высокого давления и сжатого технического аргона.

Поступающий в установку БРА-2 воздух должен быть предварительно очищен от двуокиси углерода и влаги. Если установка работает в цехе разделения воздуха, то может быть использован очищенный и осушенный сжатый воздух из общецехового коллектора высокого давления.

Очищенный от кислорода технический аргон из реципиентов установки УТА-5А под давлением 165 *кгс/см²* поступает в теплообменник *1* (см. рис. 4.54) установки БРА-2, где охлаждается обратными потоками воздуха и чистого аргона, а затем дросселируется в середину ректификационной колонны *3*, в которой имеется 40 ситчатых тарелок. Жидкий аргон собирается в межтрубном пространстве нижнего конденсатора *5*.

Сжатый воздух после теплообменника *1* дросселируется в трубное пространство конденсатора *5*, конденсируется в нем, испаряя кипящий в межтрубном пространстве чистый аргон, и через адсорбер ацетилена *4* поступает в межтрубное пространство верхнего конденсатора *2*. Часть жидкого воздуха отводится в переохладитель *6* жидкого чистого аргона и далее — в охлаждающие рубашки насосов для жидкого чистого аргона.

В трубках верхнего конденсатора жидкий воздух конденсирует азот, являющийся флегмой для орошения тарелок колонны. Из-под крышки верхнего конденсатора отводится газообразный отбросный азот, содержащий некоторое количество аргона и водород, остав-

шийся в техническом аргоне после каталитической очистки в уста новке УТА-5А. Отбросный азот может отводиться через теплообменник *1* по линии потока отходящего воздуха. В теплообменник *1* также направляется воздух из переохладителя *6* и рубашек насосов *7*.

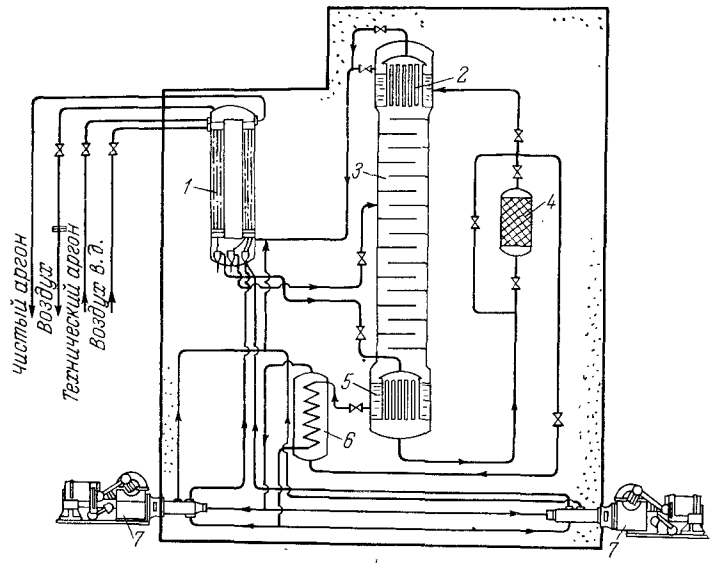



Рис. 4.54. Технологическая схема установки БРА-2:
*1* — теплообменник; *2* — верхний конденсатор колонны; *3* — колонна ректификационная; *4* — адсорбер ацетилена; *5* — нижний конденсатор колонны; *6* — переохладитель; *7* — насосы для жидкого аргона.

Жидкий чистый аргон отбирается из нижнего конденсатора и через переохладитель *6* поступает в один из насосов (второй насос является резервным), которым под избыточным давлением до 165 *кгс/см*² подается в теплообменник *1*, испаряется в нем, нагревается до плюсовой температуры и поступает в баллоны.

**Техническая характеристика установки БРА-2**

| | |
|---|---|
| Количество перерабатываемого аргона, *м*³/*ч* | 45 |
| Концентрация аргона, % | До 99,99 |
| Давление, *кгс/см*² | |
| чистого аргона | До 165 |
| технического аргона | 50—165 |
| воздуха, не менее | 165 |
| Количество воздуха высокого давления, *м*³/*ч*, не менее | 200 |
| Примесь азота в техническом аргоне, % | До 15 |
| Потери аргона с отбросным азотом, % | До 5 |
| Продолжительность | |
| пускового периода, *ч* | 15 |
| рабочей кампании, сутки | 20 |
| Вес установки, *Т* | 4,75 |



**Очистка сырого аргона цеолитами.** Очистка аргона от кислорода низкотемпературной адсорбцией кислорода цеолитами возможна благодаря тому, что эти адсорбенты поглощают больше кислорода, чем азота и аргона. Например, при 90 °К цеолит типа NaA поглощает кислорода примерно в 40—45 (по объему) больше, чем аргона или азота.

На рис. 4.55 приводится схема очистки сырого аргона цеолитами, разработанная криогенной лабораторией ВЭИ им. В. И. Ленина. Сырой аргон очищается от азота в ректификационной колонне *1*. Из куба колонны *1* выводится смесь аргона и кислорода, которая поступает через теплообменник *2* в один из переключаемых адсорберов *3*, заполненных цеолитом NaA. Чистый аргон, кислород из которого поглощен в адсорбере *3* цеолитом, проходит фильтр *4* и поступает в конденсатор *5*, где сжижается, а затем насосом *6* подается в испаритель и баллоны. Высота адсорбера около 6 *м*, время пребывания газа в адсорбере 30 *сек*, температура в слое адсорбента 93—95 °К.

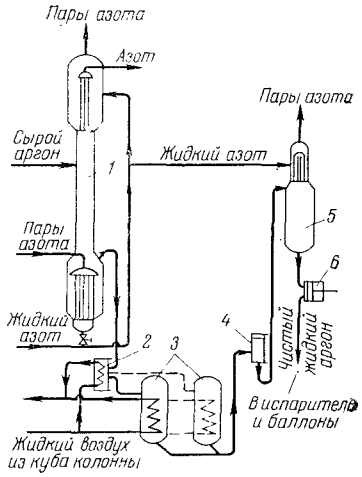



Рис. 4.55. Технологическая схема установки для очистки сырого аргона от кислорода цеолитами:
*1* — ректификационная колонна; *2* — теплообменник; *3* — адсорберы; *4* — фильтр; *5* — конденсатор; *6* — жидкостной насос.

Адсорберы охлаждаются жидким воздухом, проходящим по змеевикам, расположенным снаружи адсорбера и внутри слоя адсорбента. Для регенерации адсорбента используют сухой азот с температурой не более 20—25 °С. После регенерации адсорберы продувают чистым аргоном и заполняют гелием на период охлаждения адсорбента. Описанный способ очистки сырого аргона находит пока применение в опытных установках.

Баллоны перед наполнением чистым аргоном тщательно просушиваются, и из них вакуум-насосом откачивается воздух.

Отбросный газ содержит 15—20% аргона, до 80% азота и до 1% водорода. Потери аргона с отбросным газом составляют 2—5%.

По описанному процессу получают чистый аргон, содержащий: 99,9—99,99% аргона, 0,01—0,05% азота и менее 0,003% кислорода.

В целях упрощения установки для очистки сырого аргона от кислорода ВНИИкриогенмаш разработал установку АРТ-0,75 низкого давления*. В этой установке подача сырого аргона в реакторы

* Степ Х. Я., Увяткин И. И., Барышев Е. Н., Могильницкий С. А., Горохов В. А., Установка АРТ-0,75 для очистки сырого аргона от кислорода, Криогенное, кислородное и автогенное машиностроение, № 3, ЦИНТИхимнефтемаш, 1970.

производится под давлением столба жидкого аргона, преодолева-
щего сопротивления потоку газа. Для регенерации адсорберов бл-
ка осушки используется тепло реакции поглощения кислород.
Установка не имеет машинного оборудования и не требует затр-
электроэнергии. Сырой аргон очищается от кислорода в двух, в-
следовательно включенных реакторах методом каталитическо-
гидрирования на платиновом катализаторе. Дозировка подачи в-
дорода в реакторы производится автоматически, тем самым по-
держивается постоянная температура аргона на выходе из второ-
реактора. Осушка аргона производится в двух переключаемых а-
сорберах, заполненных цеолитом.

**Техническая характеристика установки АРТ-0,75**

| | |
|---|---|
| Количество перерабатываемого сырого аргона, $м^3/ч$ | 373—765 |
| Содержание, % | |
| кислорода в сыром аргоне | 2—4 |
| примесей в техническом аргоне, выходящем из установки, не более | |
| кислорода | 0,003 |
| водорода | 0,8 |
| Точка росы, °К, не выше | 213 |
| Давление сырого аргона на входе в установку, $кгс/см^2$ ($Мн/м^2$) | 3,8 (0,38) |

Организация производства аргона экономически целесообра-
только на крупных воздухоразделительных аппаратах. Получе-
аргона на аппаратах производительностью менее 150—200 $м^3/ч$ к-
лорода нерентабельно.

В установках, работающих по циклу только одного низк-
давления, также возможно попутное извлечение аргона. Одна-
вследствие значительного уменьшения количества флегмы, ороша-
щей верхнюю колонну*, и нарушения ректификации в моменты
переключения клапанов азотных регенераторов коэффициент извле-
ния аргона на установках низкого давления не превыша-
0,20—0,25, что значительно ниже, чем в установках высокого д-
ления или в установках с двумя давлениями. Тем не менее, у-
тывая большой объем воздуха, перерабатываемого в установк-
низкого давления, на них можно получать значительные количест-
дешевого аргона. Поэтому организация производства аргона
крупных воздухоразделительных установках низкого давления э-
номически выгодна. Включение колонны сырого аргона и колон-
чистого аргона в схему блока разделения установок низкого д-
ления КтКАр-12 (БР-1КАр) было показано на рис. 4.34. Принцип
боты этих колонн такой же, как и описанный выше для установ-
высокого давления.

* Уменьшение количества флегмы в данном случае обусловлено тем, часть перерабатываемого воздуха не подвергается предварительному разде-нию в нижней колонне, а расширяется в турбодетандере и вводится в газообр-ном виде в середину верхней колонны.



### 4.10.2. Получение криптона и ксенона

Криптон и ксенон находят широкое применение для производ-
ства осветительных и специальных ламп, радиоламп и других изде-
лий. Криптон и ксенон извлекают из воздуха попутно с разделе-
нием его на кислород и азот методом низкотемпературной ректи-
фикации. Организация извлечения криптоно-ксенонового концент-
рата из перерабатываемого воздуха, учитывая малое содержание
их в воздухе, целесообразна только на крупных воздухоразделе-
тельных агрегатах, перерабатывающих более 15 000—20 000 $м^3/ч$
воздуха. Получение криптоно-ксенона снижает себестоимость кис-
лорода, что экономически выгодно. При этом затрата энергии на
получение 1 $дм^3$ чистой криптоно-ксеноновой смеси не превышает
9—10 $квт \cdot ч$.

Технологический процесс получения криптона и ксенона вклю-
чает следующие три стадии:

1. Получение первичного (бедного) криптоно-ксенонового кон-
центрата, содержащего 0,1—0,2% криптона и ксенона (в сумме).
2. Обогащение первичного концентрата и получение из него
технического криптона, содержащего до 99% криптона и ксенона
(в сумме), или криптоно-ксеноновой смеси следующего состава:
до 95% криптона и не менее 5% ксенона.
3. Выделение из криптоно-ксеноновой смеси чистых криптона
и ксенона.

Первая стадия процесса происходит в дополнительных блоках
криптона и технического кислорода, включаемых в состав крупных
воздухоразделительных блоков. Схема работы блока криптоно-
ксенона была описана при рассмотрении технологических схем со-
ответствующих установок.

Вторая стадия, т. е. обогащение первичного концентрата до
технического криптона или криптоно-ксеноновой смеси, произво-
дится на тех же предприятиях, где получают первичный концент-
рат. Установки для обогащения размещаются в отдельном здании.

Третья стадия, как правило, осуществляется на заводах, по-
требляющих чистые криптон и ксенон, с использованием для этой
цели специальных установок и аппаратуры.

Обогащение криптоно-ксенонового концентрата приходится осу-
ществлять в несколько стадий потому, что вместе с криптоном
и ксеноном в кислороде накапливаются углеводороды (ацетилен,
метан и др.), которые необходимо периодически удалять во избе-
жание повышения их концентраций до взрывоопасных. Поэтому
при получении первичного концентрата степень обогащения его
доводят только до 0,15—0,20% (Kr+Xe), при которой содержание
углеводородов не превышает допустимых норм безопасности
(1000—1200 $мг$ углерода на 5 $дм^3$ жидкости). Для этого поддер-
живают необходимую кратность циркуляции жидкого кислорода
(первичного концентрата) в нижнем конденсаторе криптоновой ко-
лонны.

На втором этапе обогащения, т. е. при получении техническ криптоно-ксеноновой смеси, применяют способ двукратного посл довательного выжигания углеводородов в электропечах на кат лизаторе (см. ниже).

**Получение технической криптоно-ксеноновой смеси.** Обогащ ние первичного концентрата и получение технической криптон ксеноновой смеси производятся на установках УСК-1 и УСК-1М

Применяемый на установках УСК-1 способ очистки криптон вого концентрата от двуокиси углерода раствором едкого нат или едкого кали в скрубберах и осушки от влаги в баллон твердым едким кали является слишком громоздким и малоэфф тивным. Поэтому ВНИИкриогенмаш разработана более эффекти ная установка УСК-1М, в которой применяется адсорбционн очистка от $CO_2$ и осушка криптоно-ксенонового концентрата си тетическими цеолитами*.

Технологическая схема установки УСК-1М приводится рис. 4.56. Первичный (бедный) концентрат криптона-ксенона ступает в газгольдер *1* из испарителя криптонового концентра основного блока разделения воздуха. В компрессоре *2* концентр сжимается до избыточного давления 4—5 *кгс/см*² и направляет в контактную печь *3* через теплообменник *4*, в котором он пред рительно нагревается до 660—680 °С отходящим из печи очищ ным газом. Затем концентрат дополнительно подогревается в пе электроподогревателем до 700 °С и поступает в контактное пр странство печи, заполненное активным глиноземом. Здесь из ко центрата выжигаются углеводороды (метан, ацетилен и др.).

После печи газ охлаждается сначала в теплообменнике *4*, а тем водой в холодильнике *5* до 20—30 °С. Содержащиеся в га после печи двуокись углерода и пары воды поглощаются цеолит в адсорберах *7* и *8*. Очистка газа от этих примесей в адсорбер происходит при комнатной температуре. Для регенерации цеол применяется сухой азот под избыточным давлением 6 *кгс/с* подогретый в электроподогревателе *6* до 350—380 °С.

Очищенный от влаги и двуокиси углерода криптоно-ксенонов концентрат через фильтр *9* направляется в блок вторичного ко центрирования. Сначала концентрат поступает в змеевик ку колонны *17*, где охлаждается за счет испарения кубовой жидкос а затем через переохладитель *16* и дроссельный вентиль поступ на ректификацию в середину колонны. В конденсатор колонны для создания потока флегмы подается жидкий азот из основн блока. Для дополнительного испарения кубовой жидкости и обес чения необходимого количества паров в колонне в нее подводи сухой азот или воздух из основного блока. Испарившийся в ко денсаторе азот через переохладитель *16* возвращается в основн

* Казарновская Л. И., Дыхно Н. М., Очистка криптонов концентрата от двуокиси углерода и водяного пара адсорбцией на синтетичес цеолитах, Труды ВНИИкимаш, вып. 9 (1965).



блок. Обогащенный концентрат, содержащий 99,5—99,9% криптоно-ксенона, непрерывно отводится из куба колонны в испаритель *15* (подогреваемый водой) и через теплообменник *14* в газообразном виде поступает во вторую контактную печь *13*, где из него выжигаются остатки углеводородов.

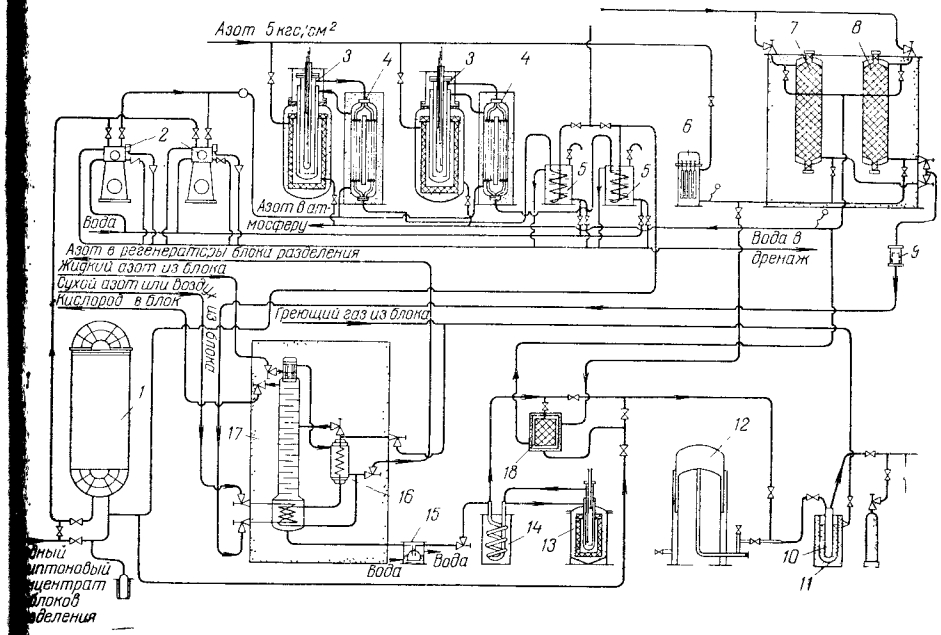



Рис. 4.56. Технологическая схема установки УСК-1М для обогащения первичного криптонового концентрата с адсорбцией $CO_2$ и $H_2O$ цеолитами:
*1, 12* — газгольдеры; *2* — компрессоры; *3, 13* — контактные печи; *4, 14* — теплообменники; *5* — холодильники; *6* — электроподогреватель; *7, 8* — адсорберы; *9* — фильтр; *10* — баллон газификатора; *11* — ванна газификатора; *15* — испаритель; *16* — переохладитель; *17* — колонна; *18* — адсорбер.

Из печи продукт снова поступает в теплообменник *14*, охлаждается в нем до +30 °С и направляется в адсорбер *18* для очистки от влаги и двуокиси углерода, а затем подается в газгольдер *12*. Затем богатая смесь Kr+Xe поступает в баллон газификатора *10*, который снаружи охлаждается жидким азотом, заливаемым в ванну *11* газификатора. Затем ванна с жидким азотом убирается, баллон обдувается теплым воздухом, а испарившийся богатый концентрат заполняет предварительно вакуумированные баллоны под избыточным давлением 50—100 *кгс/см*².

Длительность рабочего цикла блока очистки определяется динамической активностью цеолита, которая равна 8—9 *дм*³ $CO_2$/*кг* цеолита CaA. Насыпная плотность цеолита CaA равна 0,7—0,75 *кг/дм*³. Диаметр слоя адсорбента в баллоне блока очистки определяется расчетом. Объемная скорость газа (при данных ра-

бочем давлении и температуре) принимается равно 0,2 $дм^3/(мин \cdot см^2)$. Высоту слоя при данном диаметре находят и объему адсорбента, который рассчитывают по времени контакт. равному 40—60 *сек*, и по количеству двуокиси углерода, подлеж щему поглощению из потока газа, проходящего через баллон указанное время.

При использовании цеолитов содержание двуокиси углерода блоком очистки не превышает 0,002—0,003%. Точка росы газа блоком очистки составляет минус 62 — минус 68 °С при содерж нии водяного пара в криптоновом концентрате перед блоком очис ки, соответствующем точке росы от —30 до —16 °С. Переключен адсорбера на регенерацию цеолита производится, когда концентр ция $CO_2$ после него превышает 0,003%. Регенерация цеолита пр изводится азотом. Расход азота составляет 17—19 $м^3/ч$ при 0 и давлении 1 $кгс/см^2$.

**Техническая характеристика установки УСК-1М**

| | |
|---|---|
| Количество перерабатываемого криптонового концентрата (в $м^3/ч$) при содержании криптоно-ксенона | |
| 0,15% | 84 |
| 0,2—0,22% | 120 |
| Количество получаемого продукта (в $м^3/ч$) при начальной концентрации криптоно-ксенона | |
| 0,15% | 0,12 |
| 0,2—0,22% | 0,24 |
| Концентрация получаемого продукта (Кг + Хе), % | 99,5—99,9 |
| Давление, $кгс/см^2$ | |
| перерабатываемого (бедного) концентрата | 5,0 |
| обогащенного концентрата (в баллонах) | 50—100 |
| Количество жидкого азота, подаваемого из основного блока, $м^3/ч$ (в пересчете на газ) | 120 |
| Мощность I контактной печи выжигания, *квт* | |
| при работе | 6 |
| при пуске | 22 |
| Мощность II контактной печи выжигания, *квт* | |
| при работе | 1,5 |
| при пуске | 6,2 |

Адсорбер рассчитан на рабочее давление 6 $кгс/см^2$. Он изгот лен из стали Х18Н10Т, заключен в кожух с изоляцией из минера ной ваты (толщина слоя 180 *мм*). Цеолит СаА применяется в в таблеток диаметром 3,5—4 *мм*, высотой 4—5 *мм*. Для улавлива пыли сорбента применяется стеклянная ткань (сатин пятирем ный марки АСТТ-$С_1$ ВТУ 1381—56)*.

* Способ очистки и осушки криптонового концентрата цеолитами усп применяется на Лисичанской станции «Подземгаз». Блок очистки состоит из параллельно включенных адсорберов, заполненных цеолитом NaA (лучше пользовать цеолит NaX).

Регенерация цеолита производится азотом при 340—350 °С. Переключ адсорберов производится через 16 *ч*. Продолжительность рабочей кампании ка концентрирования увеличилась с 25—30 до 90—100 суток.



**Получение чистых криптона и ксенона.** Обогащенный криптоно-ксеноновый концентрат подвергают разделению в специальной установке. Получаемые чистые криптон и ксенон удовлетворяют требованиям ГОСТ 10218—67 и 10219—67. Предварительно концентрат очищается от примеси кислорода, который связывается в электропечи активной медью. Для разделения газовой смеси на криптон и ксенон применяется метод адсорбции ксенона углем при минус 65 — минус 75 °С с последующей десорбцией его сначала при понижении давления над адсорбентом, а затем — при постепенном нагревании адсорбера. Чистые криптон и ксенон собирают в соответствующих газгольдерах, откуда они периодически направляются в газификаторы, сжижаются, а затем испаряются и заполняют баллоны. Для регенерации адсорбента используется вакуум-насос. Фракции промежуточного состава собирают в отдельном газгольдере и затем вновь направляют на разделение, примешивая их к свежему обогащенному концентрату. В качестве адсорбента применяют активированный уголь марки АГ-3 или СКТ.

### 4.10.3. Получение неоно-гелиевой смеси

В атмосферном воздухе содержится 0,0018% неона и 0,0005% гелия. Неон и гелий в процессе ректификации воздуха собираются в газообразном виде под крышкой конденсатора колонны двукратной ректификации. Смесь этих газов, содержащая 8—10% неона и гелия (остальное азот), удаляется обычно через вентиль или диафрагму в трубопровод отходящего азота.

При попутном извлечении неоно-гелиевой смеси в качестве полупродукта для последующего получения из него неона концентрацию последнего в смеси искусственно повышают, для чего применяется дополнительный дефлегматор, включаемый в воздухоразделительный аппарат (рис. 4.57). Дефлегматор, например, к аппарату КТ-1000 представляет собой трубчатку из семи медных трубок диаметром 6 *мм* и длиной 1000 *мм*. Неоно-гелиево-азотная смесь из-под крышки конденсатора непрерывно поступает в трубки дефлегматора *2*, где бо́льшая часть газообразного азота конденсируется; жидкость стекает обратно в карманы конденсатора через U-образную трубку гидравлического затвора. В межтрубное пространство дефлегматора через вентиль *1* из карманов конденсатора подается жидкий азот, который конденсирует азот в трубках дефлегматора, а затем в виде смеси пара и жидкости поступает на верхнюю тарелку верхней колонны. Газообразная смесь, содержащая в сумме до 50% неона и гелия (остальное азот), отводится из верхней части дефлегматора в газгольдер через вентиль *5*. Количество отводимой неоно-гелиевой смеси измеряется диафрагмой *6* с дифманометром и должно составлять 100 $дм^3/ч$. Вентиль *1* открывают настолько, чтобы уровень жидкости в дефлегматоре оставался постоянным. Получаемый из неоно-гелиевой смеси чистый

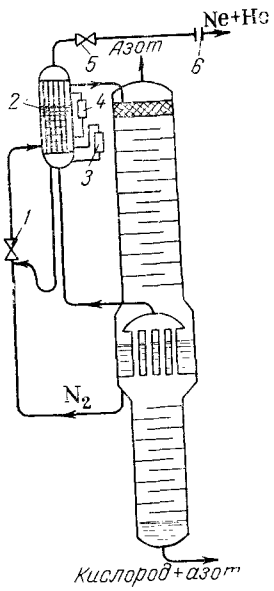



Рис. 4.57. Схема включения дефлегматора для обогащения неоно-гелиевой смеси:

*1* — дроссельный вентиль на линии подачи жидкого азота в дефлегматор; *2* — неоно-гелиевый дефлегматор; *3, 4* — указатели уровня; *5* — вентиль для отбора неоно-гелиево-азотной смеси из дефлегматора в газгольдер; *6* — диафрагма расходомера.

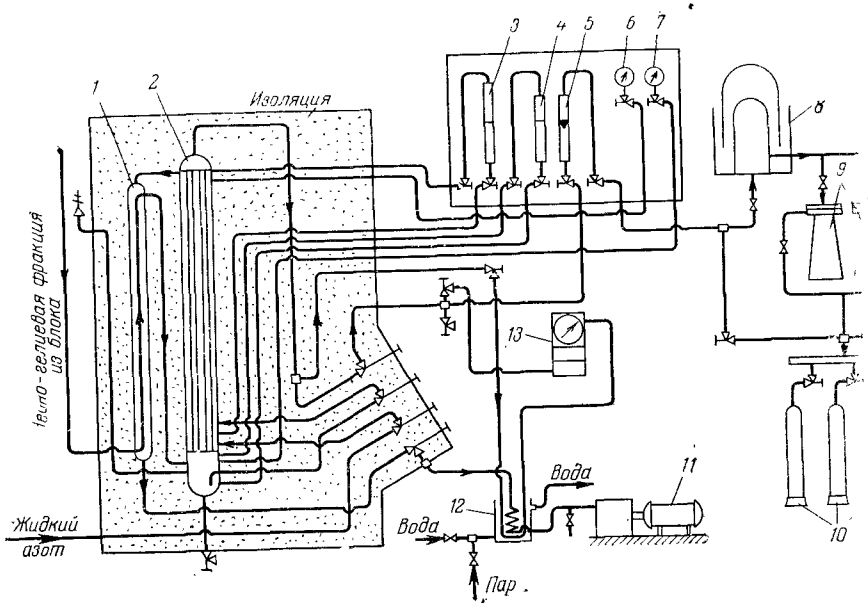



Рис. 4.58. Схема установки для получения «сырой» неоно-гелиевой см

*1* — теплообменник; *2* — дефлегматор; *3, 4* — указатели уровня; *5* — указатель расход *7* — манометры; *8* — газгольдер; *9* — мембранные компрессоры; *10* — баллоны; *11* — у м-насос; *12* — подогреватель; *13* — газоанализатор.

неон применяется для заполнения сигнальных и газосветных ламп, а также для других технических нужд.

За последние годы потребность промышленности в неоне сильно возросла в связи с использованием его в криогенной технике. Поэтому в качестве источника сырья для производства чистого неона организован отбор неоно-гелиевой смеси из блоков крупных воздухоразделительных установок (см. разд. 4.7). Отбираемая неоно-гелиевая фракция, содержащая 40% (Ne+He) и 60% $N_2$, подвергается переработке в сырую неоно-гелиевую смесь на установке, схема которой дана на рис. 4.58. Неоно-гелиевая фракция из основного блока разделения воздуха поступает в теплообменник *1*, где охлаждается парами отходящего азота, а затем направляется в трубки дефлегматора *2*, где она обогащается Ne и He в результате конденсации азота. В межтрубное пространство дефлегматора поступает жидкий азот из основного блока. Вакуум-насос *11* откачивает пары азота для понижения температуры ванны жидкого азота в дефлегматоре. Пары азота перед поступлением в насос нагреваются в теплообменнике *1* и подогревателе *12*. Обогащенная неоно-гелиевая смесь собирается в газгольдере *8*, откуда перекачивается мембранными компрессорами *9* в баллоны *10*. Установка снабжена указателями уровня *3*, *4*, указателем расхода *5*, манометрами *6*, *7* и газоанализатором *13*. Баллоны наполняются сырой неоно-гелиевой смесью под давлением 150—165 *кгс/см*². При работе без откачки паров азота производительность установки составляет около 600 *дм*³/*ч* неоно-гелиевой смеси, содержащей 75—78% (Ne+He); коэффициент извлечения Ne+He равен 0,50—0,52.

Дальнейшую переработку сырой неоно-гелиевой смеси для извлечения из нее чистого неона производят на специальной установке в два этапа. Сначала из смеси удаляют азот в дефлегматоре-адсорбере и получают так называемую техническую неоно-гелиевую смесь. Затем полученную смесь разделяют адсорбцией активированным углем марки АГ-2 или конденсационным методом, получая чистый неон. Адсорбционный метод применяется при получении небольших количеств продукта (60—200 *дм*³/*ч* неона) и является более простым. При производстве относительно больших количеств неона в жидком виде применяют более сложные, но зато и более производительные конденсационные методы. Коэффициент извлечения чистого неона из перерабатываемой смеси при адсорбционном способе составляет 0,73—0,74, при конденсационном — 0,95.

ГЛАВА 5

# МАШИНЫ ДЛЯ СЖАТИЯ ВОЗДУХА

## 5.1. ПОРШНЕВЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Воздушный компрессор — один из основных агрегатов возду разделительной установки — используется для сжатия воздуха давления, требуемого в холодильном цикле. Соответственно кон ному давлению сжатия применяются различные типы поршнев компрессоров производительностью от 65 до 7500 *м³/ч* с конечн избыточным давлением сжатия от 6 до 220 *кгс/см²*.

**Одноступенчатые компрессоры** выпускаются, как правило, конечное избыточное давление сжатия не выше 5—6 *кгс/см²*. Д более высоких давлений изготавливаются компрессоры с дву тремя, четырьмя, пятью и шестью ступенями сжатия. В установк разделения воздуха применяются многоступенчатые поршнев компрессоры, у которых температуры в конце сжатия возду ниже, чем в одноступенчатых машинах; одноступенчатые компр соры используются только для вспомогательных целей (наприм для поддува в основной компрессор).

Рассмотрим процесс работы одноступенчатого компрессора.

График изменения давления газа в цилиндре в зависимости положения поршня представляет собой индикаторную диаграм одноступенчатого компрессора (рис. 5.1). На замкнутой кри показывающей постепенное изменение давления в цилиндре в зависимости от объема, описываемого поршнем $V$, точк (рис. 5.1, *а*) соответствует левому крайнему положению (лев мертвая точка), а точка *3* — правому крайнему положению (пра мертвая точка) поршня. Линии на диаграмме соответству *1—2* — расширению воздуха, оставшегося в цилиндре от преды щего хода поршня справа налево; *2—3* — всасыванию возду в цилиндр через всасывающий клапан; *3—4* — сжатию возду в цилиндре при ходе поршня справа налево; *4—1* — выталкиван сжатого воздуха через нагнетательный клапан. Прямая *2—3* со ветствует давлению всасывания $p_{вс}$, $V_s$ — объем, описываем поршнем за полный ход; $V_{вс}$ — полезный объем всасывания.

В крайнем положении поршня между ним и крышкой цилин а также в клапанах и каналах всегда остается постоянный объ



в котором находится некоторое количество сжатого воздуха. Этот объем называется *вредным* или *мертвым объемом* (пространством) и обозначается $V_0$. Остающийся в нем воздух при обратном движении поршня расширяется по линии *1—2* и тем уменьшает полезный объем цилиндра. Полезным объемом всасывания в этом случае будет величина $V_{вс}$, пропорциональная ходу поршня между точками *2—3*. Разность $V_s - V_{вс} = V_{по}$ называется *парализованным объемом* цилиндра, который не используется в результате расширения газа, находящегося в мертвом объеме. Отношение $a = V_0/V_s$ называется *относительным мертвым пространством*. Обычно эта величина равна 4—12% полного объема, описываемого поршнем.

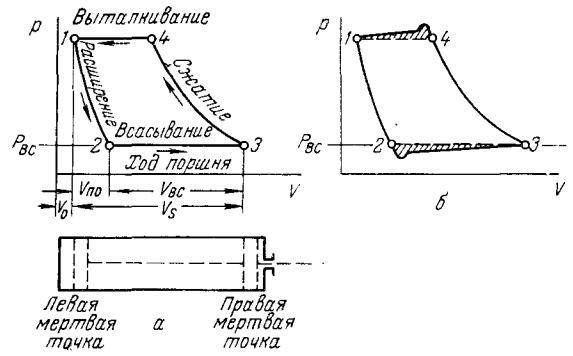



Рис. 5.1. Индикаторная диаграмма одноступенчатого компрессора (на схеме цилиндра клапаны не показаны): *а* — теоретическая; *б* — действительная.

*Линейным вредным пространством* называется *зазор между крышкой цилиндра компрессора и поршнем, когда последний находится в крайнем положении*. Зазор необходим для того, чтобы предотвратить удары поршня о крышку во время работы компрессора; без него удары неизбежны вследствие удлинения штока от нагревания во время работы компрессора, а также из-за зазоров в подшипниках шатунно-кривошипного механизма. Линейное вредное пространство принимается практически 2—5 *мм*.

Отношение полезного объема всасывания $V_{вс}$ к полному объему, описываемому поршнем $V_s$, т. е. $V_{вс}/V_s$ называется *объемным коэффициентом компрессора* (или ступени). Его можно также выражать через отрезки хода поршня, пропорциональные $V_{вс}$ и $V_s$.

**Пример.** Пусть по диаграмме (рис. 5.1) имеем: отрезок хода поршня, пропорциональный $V_{вс}$, равен 50 *мм*, а пропорциональный $V_s$, — 60 *мм*. Следовательно

$$\lambda_V = \frac{50}{60} = 0{,}83, \quad \text{или} \quad 83\%$$

При прохождении через всасывающий клапан компрессора воздух дроссе лируется и линия всасывания располагается ниже линии атмосферного давлени (рис. 5.1, *б*). При начале обратного хода поршня давление воздуха в цилиндр повышается до атмосферного. Затем воздух начинает сжиматься, вследствие чег точка начала линии сжатия *3* располагается на диаграмме несколько левее пра вой мертвой точки. Это уменьшает величину полезного объема всасывания д значения $V'_{вс}$ ($V'_{вс} < V_{вс}$). Если учитывать также влияние дросселирования во духа при всасывании, то значение объемного коэффициента следует определят как отношение

$$\lambda_V = \frac{V'_{вс}}{V_S}$$

Величина объемного коэффициента компрессора зависит о размера вредного пространства и степени сжатия (см. ниже) С повышением этих величин объемный коэффициент снижается Чем меньше вредное пространство, тем больше объемный коэффи циент и тем большее количество воздуха будет подаваться за каж дый ход поршня. Следовательно, уменьшение вредного пространст ва имеет важное значение для повышения производительност компрессора. При монтаже и эксплуатации воздушных компрессо ров необходимо добиваться минимальной величины вредного про странства при условии обеспечения безопасной работы машины.

Величину линейного вредного пространства определяют при по мощи свинцовой проволоки, которую закладывают через отверстие клапана между крышкой цилиндра и поршнем. Поршень, находяс в крайнем положении, сплющивает проволоку. Измерив микромет ром ее толщину, определяют размер вредного пространства.

Объем вредного пространства определяют при монтаже по объ ему жидкости (воды, масла, керосина), заливаемой в цилиндр ком прессора из мерного сосуда через клапанную коробку. При этом поршень поворотом вала вручную ставят в соответствующее край нее положение.

Основной характеристикой компрессора является его объем ная производительность, *измеряемая объемом воздух* (в *м*³), *подаваемого компрессором за 1 мин* (за 1 *ч*) *при темпера туре и давлении всасывания*. Умножив величину объемной произво дительности на плотность газа (в *кг/м*³) при том же давлени и той же температуре, получают *производительность* по масс (в *кг/мин* или *кг/ч*).

Объемная производительность пропорциональна объему, опи сываемому поршнем за 1 *мин* (1 *ч*). Иногда объем всасываемог воздуха приводят к стандартным условиям (20 °С, 760 *мм рт. ст.* тогда получают объемную производительность при стандартны условиях. Полный объем $V_п$, описываемый поршнем, равен:

$$V_п = Fsn \ м^3/мин \quad \text{или} \quad V_п = Fsn \cdot 60 \ м^3/ч \qquad (5$$

где $F$ — полезная площадь поршня*, *м*²;
$s$ — длина хода поршня, *м*; $n$ — число оборотов вала в 1 *мин*.

* За вычетом площади сечения штока, входящего в цилиндр.



Для компрессора двойного действия, в котором всасывание и сжатие газа происходят с двух сторон поршня, подсчитывают объемы, описываемые поршнем с обеих сторон, и полученные величины складывают.

Действительный объем поданного газа всегда меньше объема, описываемого поршнем, вследствие наличия вредного пространства, утечки газа через неплотности во всасывающих и нагнетательных клапанах, сальнике, поршневых уплотнениях, дросселирования при всасывании, влияния температуры и влажности воздуха.

*Отношение действительного объема газа* $V_к$ (приведенного к стандартным условиям или условиям всасывания), *подаваемого компрессором в нагнетательный патрубок, к объему* $V_п$, *описываемому поршнем, называется коэффициентом подачи* $\lambda$. Этот коэффициент характеризует качество изготовления и условия эксплуатации компрессора. Коэффициент подачи обычно равен 0,65—0,80. Для подсчета объемной производительности компрессора $V_к$ следует величину полного объема $V_п$, описываемого поршнем в 1 *мин* (1 *ч*), умножить на коэффициент подачи $\lambda$, т. е.

$$V_к = V_п \lambda \ м^3/мин \ (м^3/ч)$$

**Пример**. Площадь поршня компрессора одинарного действия 0,03 *м*², ход поршня 170 *мм* (0,17 *м*), скорость вращения вала 530 *об/мин*, коэффициент подачи 0,8. Производительность компрессора, отнесенная к условиям всасывания, равна $0{,}03 \cdot 0{,}17 \cdot 530 \cdot 60 \cdot 0{,}8 = 130 \ м^3/ч$.

Общий коэффициент подачи $\lambda$ является произведением следующих коэффициентов компрессора:

$\lambda_V$ — объемного, равного для I и II ступени 0,90—0,92, для последующих — 0,88—0,92;

$\lambda_т$ — теплового, равного 0,975—0,99;

$\lambda_p$ — давления, равного для I ступени 0,95—0,98; для последующих — 0,97—1,0;

$\lambda_у$ — утечек, равного 0,94—0,98;

$\lambda_{вл}$ — влажности (только для I и II ступени), равного

$$\lambda_{вл} = \frac{p_{вс} - \varphi p_{в.п}}{p_{вс}}$$

$\varphi$ — относительная влажность воздуха;
$p_{в.п}$ — давление водяных паров при температуре всасывания.

Для увеличения коэффициента подачи, а следовательно, и пр изводительности компрессора необходимо:

1) уменьшать сопротивление всасывающих клапанов, всасыва щей трубы и фильтра компрессора;

2) устранять пропуски газа, возникающие вследствие негерм тичности сальников, клапанов, поршневых колец, фланцевых с единений и пр.;

3) сокращать по возможности объем вредного пространства.

Повышение температуры и влажности всасываемого возду также снижает производительность компрессора по массе. Поэт му в летнее время масса воздуха, поступающего в установк уменьшается.

Площадь индикаторной диаграммы, ограниченная линия *1—2—3—4—1* (см. рис. 5.1, *а*), представляет собой работу, зат ченную в компрессоре на сжатие воздуха. Вследствие сопротив ния клапанов действительная работа будет больше теоретичес на величину заштрихованных участков (рис. 5.1, *б*).

Работу, затрачиваемую на изотермическое сжатие возду в компрессоре, подсчитывают по формулам (2.16) или (2.17), п веденным в гл. 2.

Мощность компрессора при изотермическом сжатии $N_{из}$ (в *к* определяют по формуле

$$N_{из} = 0{,}64 \cdot 10^{-6} R T_{вс} G \lg \frac{p_н}{p_{вс}} \qquad (5$$

где $G$ — количество сжимаемого воздуха, *кг/ч*;
$R$ — характеристическая постоянная, *кгс·м/(кг·град)*;
$T_{вс}$ — абсолютная температура всасывания, °К;
$p_н$ и $p_{вс}$ — абсолютные давления нагнетания и всасывания, *кгс/см²*.

Мощность на валу компрессора $N_к$ (в *квт*) равна

$$N_к = \frac{N_{из}}{\eta_{из}} \qquad (5$$

где $\eta_{из}$ — изотермический к.п.д.; для крупных тихоходных компрессоров нимается 0,55—0,7; для машин средней мощности — 0,5—0,6; небольших компрессоров — 0,3—0,5.

Мощность компрессорной установки $N_{к.у}$ (в *квт*) равна

$$N_{к.у} = \frac{N_к}{\eta_{пр}}$$

где $\eta_{пр}$ — к.п.д. привода; принимается равным 0,96—0,99.

Мощность электродвигателя $N_{э.дв}$ (в *квт*) равна

$$N_{э.дв} = (1{,}1 - 1{,}15)\, N_{к.у}$$



Пользуясь снятыми индикаторными диаграммами компрессора, можно установить ряд отклонений от нормальной работы машины. Некоторые примеры таких отклонений даны на рис. 5.2.

**Многоступенчатые поршневые компрессоры.** Одноступенчатое сжатие до избыточного давления, превышающего 6 *кгс/см²*, приводит к слишком высокой конечной температуре сжатия, в результате чего нормальная работа компрессора затрудняется и даже становится невозможной. Кроме того, при повышении давления сжатия в одноступенчатом компрессоре сильно уменьшается его

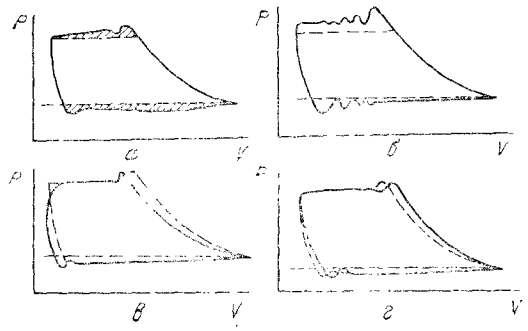



Рис. 5.2. Отклонения на индикаторной диаграмме компрессора, вызванные различными причинами:

*а* — повышенное сопротивление всасывающих и нагнетательных клапанов; *б* — неправильно подобраны усилия клапанных пружин; *в* — неплотности во всасывающих клапанах, поршневых уплотнениях и сальниках; *г* — неплотности в нагнетательных клапанах.

объемный к. п. д. вследствие возрастания влияния вредного пространства, что снижает производительность машины. Нормальный процесс сжатия при высоких давлениях достигается в многоступенчатых компрессорах с промежуточным охлаждением воздуха после каждой степени сжатия.

На рис. 5.3 приведена схема пятиступенчатого компрессора. Воздух сжимается последовательно в пяти цилиндрах (ступенях) и при переходе из одной ступени в другую охлаждается в промежуточных холодильниках, включенных между ступенями.

Размеры цилиндров должны быть такими, чтобы в каждом из них абсолютное давление газа увеличивалось в 3—4 раза. Отношение абсолютного давления нагнетания $p_н$ к абсолютному давлению всасывания $p_{вс}$ называется *степенью сжатия* $\varepsilon$:

$$\varepsilon = \frac{p_н}{p_{вс}}$$

Для воздушных компрессоров воздухоразделительных установок степень сжатия $\varepsilon$ не должна превышать 3—4. При этом конечная температура сжатия воздуха не превысит 150—160 °С и смазочное

масло в цилиндрах компрессора не будет разлагаться и коксоват
ся. Для других компрессоров воздухоразделительных установ
степень сжатия может быть увеличена до 4—5.

**Пример.** Если манометр показывает избыточное давление: после I ступе
3 *кгс/см*² ($p_a$ = 4 *кгс/см*²), а после II ступени — 15 *кгс/см*² ($p_a$ = 16 *кгс/см*²),
степень сжатия для II ступени равна 16 : 4 = 4.

Степень сжатия — важный показатель режима и безопаснос
работы воздушного компрессора. При повышении степени сжати

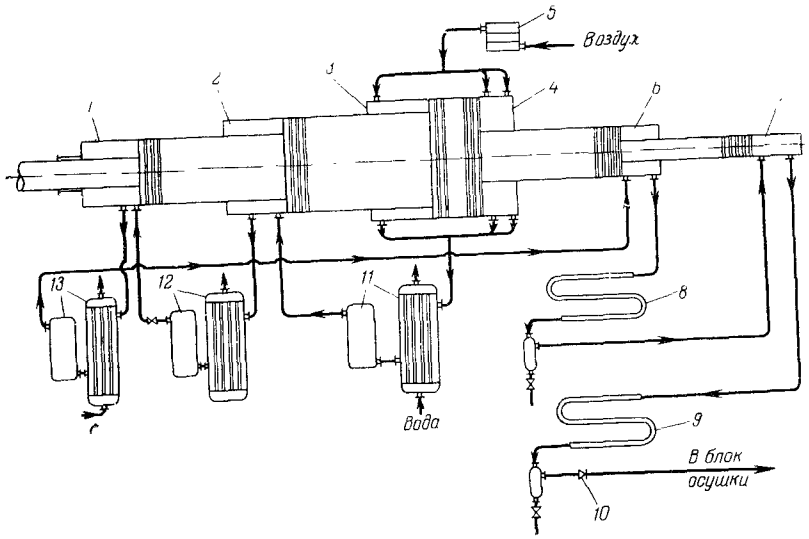



Рис. 5.3. Схема пятиступенчатого горизонтального воздушного компрес
сора марки 5Г-14/220:

*1, 2, 6, 7* — III, II, IV и V ступени; *3, 4* — левая и правая стороны I ступени; *5* — во
душный фильтр; *8, 9, 11, 12* и *13* — холодильники и масло-влагоотделители I—
ступеней; *10* — обратный клапан.

в цилиндрах работающей машины до 5 и более (например, вс
ствие поломки пластин, нарушения работы клапанов) возни
опасность аварии и необходимо немедленно принимать меры
устранения неисправности.

В многоступенчатых компрессорах степень сжатия принима
для всех ступеней примерно одинаковой. После каждой ст
воздух охлаждается в холодильниках приблизительно до той
пературы, которую он имел в начале сжатия. На практике пр
няются компрессоры со следующим числом ступеней:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Избыточное давление, *кгс/см*² . . . . . | 6 | 20 | 80 | 120—220 | 220—400 |
| Число ступеней . . . . | 1 | 2 | 3 | 4—5 | 5—6 |



Многоступенчатое сжатие обладает рядом преимуществ по сравнению с одноступенчатым: 1) лучше используется объем цилиндров компрессора; температура сжатия в каждой ступени не превышает допустимых пределов, соответствующих марке смазочного масла: 2) уменьшаются усилия, действующие на шток, шатун, вал и подшипники; 3) становится более устойчивой работа компрессора. Наконец, что самое главное, сжатие в многоступенчатых компрессорах вследствие более совершенной системы охлаждения воздуха приближается к изотермическому процессу, что наиболее экономично, поэтому удельный расход энергии на сжатие 1 *кг* воздуха будет ниже.

При увеличении числа ступеней сжатия усложняется конструкция компрессора и увеличивается его стоимость. Однако это окупается экономичностью работы многоступенчатого компрессора.

Многоступенчатые компрессоры выпускаются горизонтального и вертикального типов. Вертикальные компрессоры более быстроходны и компактны.

Производительность многоступенчатого компрессора подсчитывается по цилиндру I ступени, который в крупных компрессорах обычно выполняется двойного действия.

Технические характеристики многоступенчатых воздушных компрессоров*, применяемых для серийных воздухоразделительных установок, приведены в табл. 5.1.

## 5.2. ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

Воздушные компрессоры отличаются расположением цилиндров, типом холодильников, конструкцией базы (картера, рамы и шатунно-кривошипного механизма), производительностью, давлением и пр. Тем не менее основные части компрессоров разных конструкций имеют между собой много общего.

---

* Марка (условное обозначение) компрессора характеризует основные параметры шатунно-кривошипной базы и машины. Цифры в числителе показывают производительность в *м*³/*мин*, в знаменателе — конечное давление. Буквы означают тип машины и обычно расшифровываются так: Г — горизонтальный; П — угловой прямоугольный, У — угловой V-образный, Т-образный, Д — дожимающий, В — воздушный, Р — рядный и т. п. Цифра перед буквами означает заводской номер базы и максимальное усилие по штоку в тоннах. Цифра перед нулем — модернизацию машины. Например, 205ВП-16/70 означает: 2-я модернизация (с фланцмотором), база 5 *т*, воздушный прямоугольный, 16 *м*³/*мин*, на 70 *кгс/см*². На некоторых заводах буквенные обозначения могут иметь и другие значения в соответствии с принятой на заводе системой классификации машин.

Таблица 5.1. **Технические характеристики многоступенчатых воздушных компрессоров воздухоразделительных установок**

| | КВ-100У | 2Р-3/220 | 1,5 ПКО-3,4/400* | АВШ-3,7/220 | КВ-2М | 2СГ-50 | КД8-5/220 | 202ВП-4/220 | 205ВП-16/70 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Тип компрессора | Вертикальный | Вертикальный | Вертикальный | Вертикальный | Вертикальный | Вертикальный | Вертикальный дожимающий | Угловой | Угловой |
| Число ступеней сжатия | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 |
| Производительность (при 20 °С и 760 *мм рт. ст.* на всасывании), $м^3/ч$ | 120 | 180 | 204 | 220 | 210—220 | 780 | 480 | 240 | 960 |
| Наивысшее рабочее избыточное давление, $кгс/см^2$ | 200 | 220 | I режим—400<br>II режим—350<br>III режим—220 | 200 | 200 | 50 | 220 | 220 | 70 |
| Число оборотов вала, *об/мин* | 600 | 400 | 585 | 1470 | 550 | 365 | 500 | 735 | 500 |
| Ход поршня, *мм* | 170 | 150 | 160 | — | 185 | 250 | 170 | — | 220 |
| Диаметр цилиндров по ступеням, *мм* | | | | | | | | | |
| I | 200 | 330 | 2×210 | — | 270 | 370 | 175 | — | 500 |
| II | 105 | 170 | 210/135 | — | 160 | 225 | 115 | — | 270 |
| III | 55 | 80 | 210/190 | — | 75 | 225/190 | 65 | — | 145 |
| IV | 28 | 40 | 48 | — | 35 | — | 40 | — | 100 |
| V | — | — | 25 | — | — | — | — | — | — |
| Конечное избыточное давление сжатия по ступеням, $кгс/см^2$ | | | Режимы I II III | | | | | | |
| I | 2—2,5 | 2,2 | 2,5 2,5 2,5 | 2,4—2,8 | 2,7—2,8 | 3,8 | 14—15 | 2,25 | 2,6 |
| II | 12—14 | 15 | 12 12 10 | 9,5—11,0 | 14—15 | 17 | 38—40 | 10,8 | 9,0 |
| III | 50—55 | 60 | 50 45 40 | 32—37 | 55—60 | 50 | 98—100 | 31 | 23 |
| IV | 180—200 | 220 | 160 125 120 | 78—87 | 200 | — | 220 | 95 | 70 |
| V | — | — | 400 350 220 | 200 | — | — | — | 220 | — |
| VI | — | — | — — — | — | — | — | — | — | — |
| Мощность электродвигателя, *квт* | 55 | 68 | 100 | 70 | 75—100 | 200 | 100 | 75 | 200 |
| Расход охлаждающей воды, $м^3/ч$ | 5 | 7,5 | 8,5 | 5,3 | 7,5—8,5 | 10,8 | 6,5 | 6,0 | 15 |
| Расход цилиндрового масла, *г/ч* | 90 | 200 | 250 | 90 | 100 | 70 | 120 | 40 | 100 |
| Расход машинного масла, *г/ч* | 90 | 100 | 40 | — | 100 | 80 | — | — | 120 |
| Производительность кислородной установки, для которой применяется данный компрессор, $м^3/ч$ | 17 | 30 | 30 | 70 *кг/ч* жидк. $O_2$ | 30 | 115 | 300 | 50 | 150 |
| Тип установки | СКАДС-17; УКА-0,11 | АКГН-115/18 К-0,04 | К-0,04Т | АКДС-70М СКДС-70 | СКДС-30 | УКГС-100; УАКГС-780 | КГ-300М | АжА-0,04; КжАж-0,04 | КГСН-150; АКГСН-960 |

* Заменяет КВ-100У и 2Р-3/220.
** С начального избыточного давления 5,5 $кгс/см^2$.
*** Оппозитный—со встречным движением поршней.

*Продолжение*

| | 205ВП-30/8 | 7ВП-20/220 | 4М10-40/70 | ВП-50/8 | 5Г-14/220 | 4Г-40/5,5-220 | 4Г-80/5,5-220 | 50Т-130/200 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Тип компрессора | Угловой | Угловой | Горизонтальный оппозитный | Угловой | Горизонтальный | Горизонтальный дожимающий** | Горизонтальный дожимающий** сдвоенный | Горизонтальный Т-образный оппозитный*** |
| Число ступеней сжатия | 2 | 6 | 4 | 2 | 5 | 4 | 4 (8 цилиндров) | 5 |
| Производительность (при 20 °С и 760 *мм рт. ст.* на всасывании), *м³/ч* | 1800 | 1140 | 2600 | 3000 | 745 | 2400 | 4800 | 7200 |
| Наивысшее рабочее избыточное давление, *кгс/см²* | 8 | 220 | 70 | 8 | 220 | 220 | 220 | 200 |
| Число оборотов вала, *об/мин* | 500 | 375 | 500 | 375 | 167 | 167 | 167 | 300 |
| Ход поршня, *мм* | 220 | — | 220 | 300 | 550 | 550 | 550 | 400 |
| Диаметр цилиндров по ступеням, *мм* | | | | | | | | |
| I | 470 | — | 600 | 600 | 450/110 и 455/380 | 440 | 440 | 840 |
| II | 300 | — | 330 | 350 | 380/210 | 245 | 245 | 840 |
| III | — | — | 190 | — | 210/90 | 170 | 170 | 370 |
| IV | — | — | 140 | — | 110/58 | 90 | 90 | 260 |
| V | | | | | 58 | | - | 140 |

*Продолжение*

| | 205ВП-30/8 | 7ВП-20/220 | 4М10-40/70 | ВП-50/8 | 5Г-14/220 | 4Г-40/5,5-220 | 4Г-80/5,5-220 | 50Т-130/200 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Конечное избыточное давление сжатия по ступеням, *кгс/см²* | | | | | | | | |
| I | 2,4 | 2 | 2,6 | 2,2 | 1,75—1,0 | 15 | 15 | 2,4 |
| II | 8,4 | 6,45 | 9,0 | 8 | 7—8,5 | 35,5 | 35,5 | 7,3 |
| III | — | 16,3 | 23 | — | 25—29 | 88,5 | 88,5 | 26,2 |
| IV | — | 39,5 | 70 | — | 73—81 | 220 | 220 | 81,7 |
| V | — | 95,0 | — | — | 220 | — | — | 200 |
| VI | — | 220 | — | | - | — | — | — |
| Мощность электродвигателя, *квт* | 197 | 280 | 630 | 300 | 250 | 420 | 840 | 2000 |
| Расход охлаждающей воды, *м³/ч* | 8,4 | 24,5 | 43,2 | 15 | 43 | 34 | 68 | 185 |
| Расход цилиндрового масла, *г/ч* | 80 | 230 | Без смазки цилиндров | 115 | 200 | 300 | 600 | 1700 |
| Расход машинного масла, *г/ч* | 120 | — | — | 120 | 285 | 500 | 1000 | 1000 |
| Производительность кислородной установки, для которой применяется данный компрессор, *м³/ч* | 300 | 230 *кг/ч* | 420 | 400 | 150 и 1000 | 3600 | 3600 | 1600 *кг/ч* |
| Тип установки | КГ-300М | Аж-0,25-1 | К-0,4; АК-1,5 | ГЖА-2000 | КЖ-150; КТ-1000М | КТ-3600Ар; БР-4А | КТ-3600Ар | КЖ-1 ЖА-1 КЖ-1Ар КЖА-1 КЖГ-1 |

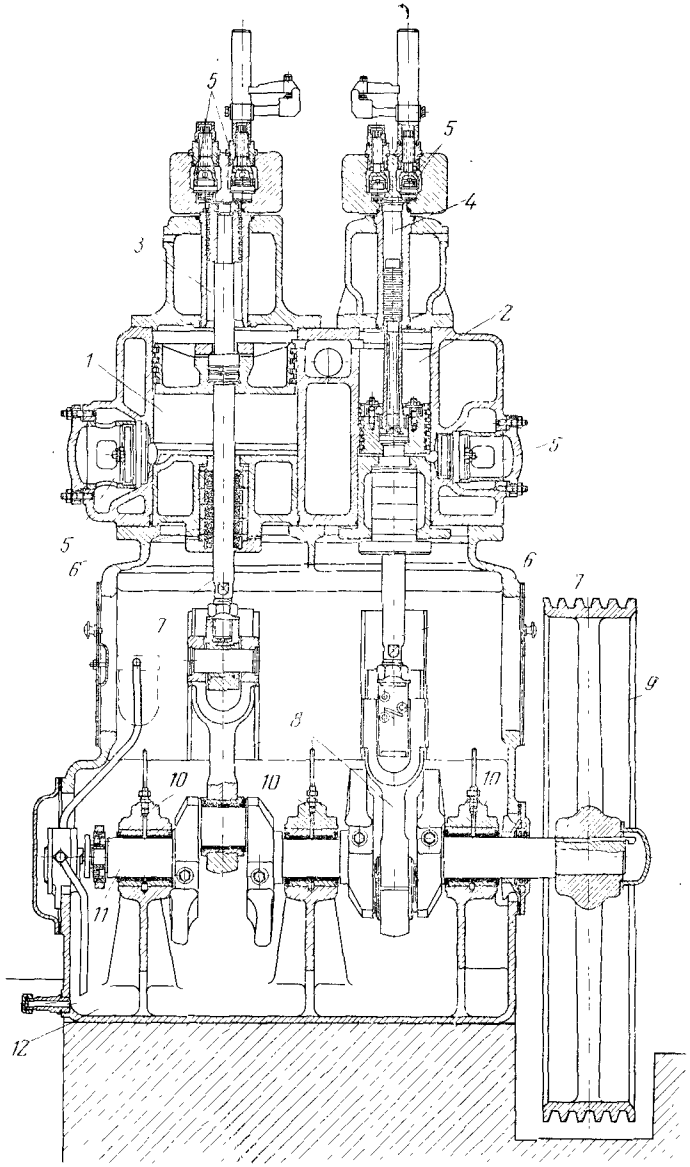



Рис. 5.4. Вертикальный четырехступенчатый компрессор 2Р-3/220:

*1, 2, 3* и *4* цилиндры I, II, III и IV ступеней; *5* — клапаны; *6* — сальники; *7* — штоки; *8* — шатуны; *9* — маховик; *10* — коренные подшипники; *11* — колеичатый вал; *12* — картер; *13* — холодильник I ступени; *14* — холодильники II и III ступеней

В качестве примера на рис. 5.4 показан разрез вертикального четырехступенчатого компрессора марки 2Р-3/220, а на рис. 5.5 разрез горизонтального многоступенчатого компрессора 5Э-14/220 производительностью 800 *м³/ч*.

Основным направлением в развитии современного компрессоростроения является создание компактных быстроходных машин с приводом непосредственно от встроенного электродвигателя (фланцевого типа). Воздухоразделительные установки комплектуются также компрессорами углового типа серийного выпуска. В этих конструкциях с расположением цилиндров под прямым углом (одна ось горизонтальная, вторая — вертикальная) инерционные усилия, действующие на вал, значительно снижены и отсутствует такая громоздкая деталь, как маховик.

На рис. 5.6 показана схема углового воздушного компрессора марки 202ВП-4/220 (завод «Борец»), применяемого для комплектации воздухоразделительных установок КжЛж-0,04. Компрессор имеет пять ступеней сжатия. Привод осуществляется от фланцевого электродвигателя, крепящегося к фонарю рамы компрессора. В раму компрессора встроен также ребристый холодильник I ступени. Холодильники остальных ступеней — змеевиковые и расположены в отдельных ваннах, устанавливаемых ниже уровня фундамента компрессора на 600 *мм*. Общий вид установки компрессора показан на рис. 5.7.

**Техническая характеристика компрессора**

| | |
|---|---|
| Производительность при 20 °С, 760 *мм рт. ст.*, *м³/ч* | 240±5% |
| Давление всасывания | Атмосферное |
| Избыточное давление нагнетания, *кгс/см²* | До 220 |
| Число оборотов в 1 *мин* | 735 |
| Потребляемая мощность, *квт*, не более | 61 |
| Расход охлаждающей воды, *дм³/ч* | 100 |
| Расход масла для смазки цилиндров, *г/ч* | 45 |

Компрессор имеет щит управления с расположенными на нем контрольно-измерительными приборами и приборами автоматического управления работой компрессорной установки в целом, а также приборами автоматической защиты от аварий.

На рис. 5.8 (см. Приложение) показаны разрезы углового компрессора 205ВП-16/70 производительностью 960 *м³/ч* на избыточное давление 70 *кгс/см²*. Вал компрессора вращается на роликовых подшипниках. Цилиндры I и III ступеней расположены вертикально. Холодильник I ступени компактной конструкции изготовлен из оребренных труб, холодильники II и III ступеней кожухотрубные, а IV ступени — типа «труба в трубе» с продольными ребрами. Привод компрессора осуществляется от фланцевого синхронного электродвигателя. В компрессоре предусмотрены блокировка по давлению масла, сигнализация превышения температуры сжимаемого воздуха и перегрева обмотки статора электродвигателя, автоматический спуск конденсата из масло-влагоотделителей между



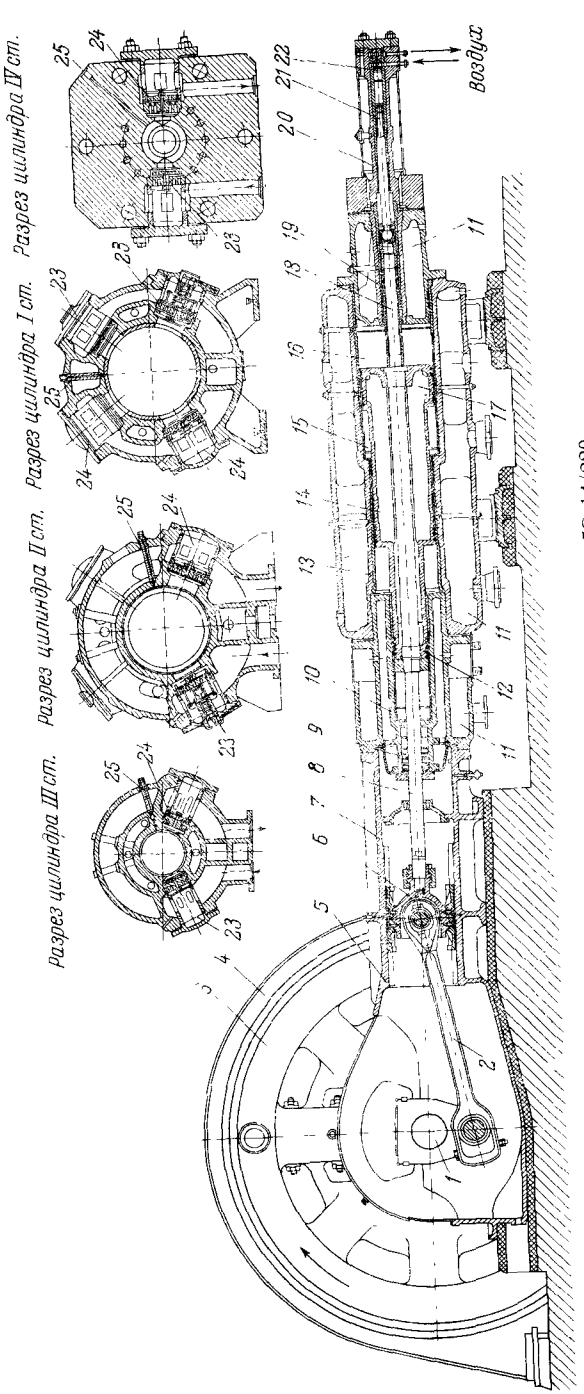



Рис. 5.5. Горизонтальный компрессор 5Э-14/220:

*1* — коленчатый вал; *2* — шатун; *3* — ротор электродвигателя (он же служит маховиком); *4* — статор; *5* — станина; *6* — крейцкопф; *7* — параллели; *8* — шток; *9* — сальник III ступени; *10* — цилиндр III ступени; *11* — охлаждающие рубашки цилиндров; *12* — поршень III ступени; *13* — цилиндр II ступени; *14* — поршень II ступени; *15*, *16* — полости цилиндра I ступени; *17* — поршень I ступени; *18* — поршень IV ступени; *19* — цилиндр IV ступени; *20* — цилиндр V ступени; *21* — поршень V ступени; *22* — всасывающий и нагнетающий клапаны; *23* — всасывающие клапаны; *24* — нагнетательные клапаны; *25* — отверстия для индикатора.

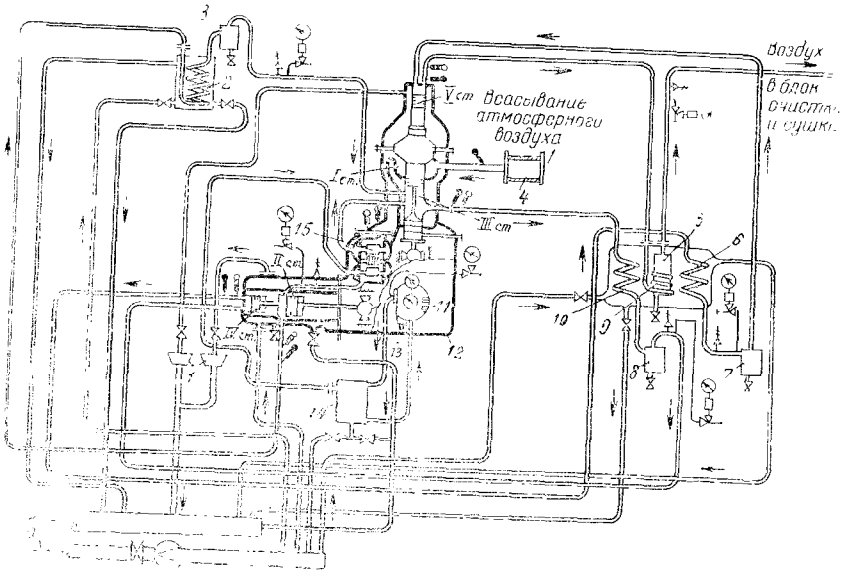



Рис. 5.6. Схема воздушного компрессора 202ВП-4/220 завода «Борец»:
1 — сливные воронки; 2, 6, 9 и 10 — змеевиковые холодильники II, IV, V и III ступеней; 3, 5, 7 и 8 — масло-влагоотделители II, V, IV и III ступеней; 4 — воздушный фильтр; 11 — щелевой масляный фильтр; 12 — воздушный компрессор; 13 — шестеренчатый масляный насос; 14 — холодильник для масла; 15 — ребристый холодильник I ступени.

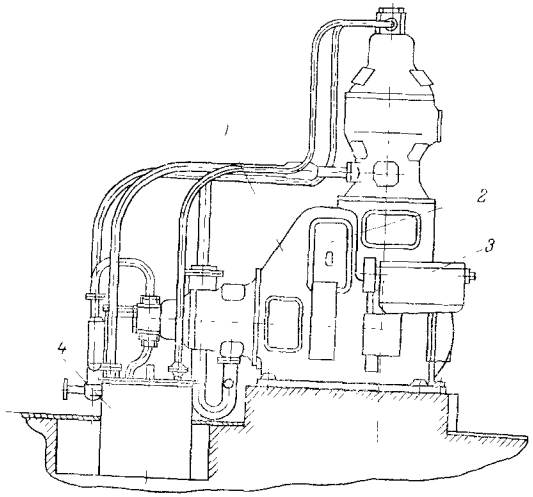


Рис. 5.7. Общий вид установки компрессора 202ВП-4/220:
1 — компрессор; 2 — холодильник I ступени; 3 — лубрикатор; 4 — холодильники III, IV и V ступеней.

ступенями и защита на случай прекращения подачи охлаждающей воды.

В процессе эксплуатации аналогичных компрессоров марки 105ВП-16/70 в комплекте воздухоразделительных установок на некоторых предприятиях были проведены мероприятия для повышения надежности машины при длительной непрерывной работе. К таким усовершенствованиям относится замена:

продольных антивибрационных стальных планок (уголков), приваренных к трубкам холодильников II и III ступеней,— деревянными (дубовыми) прокладками;

стальных трубок холодильников — трубками из красной меди;

встроенного холодильника I ступени — выносным холодильником с красномедными трубками;

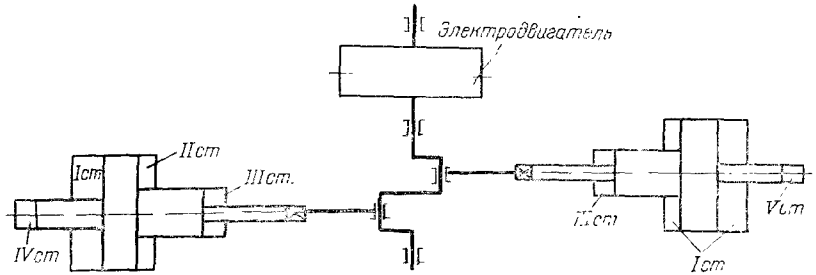



Рис. 5.9. Схема расположения цилиндров горизонтального оппозитного компрессора 50Т-130/200.

штатного маслохолодильника — змеевиковым, изготовленным из трубки красной меди;

чугунных нажимных стаканов всасывающих и нагнетательных клапанов — сварными из стали.

В крупных, относительно тихоходных горизонтальных многоступенчатых компрессорах применяется так называемая оппозитная схема расположения цилиндров, при которой поршни движутся навстречу друг другу (рис. 5.9). К таким машинам относятся, например, компрессоры 50Т-130/200, применяемые в установках для получения жидкого кислорода КЖ-1, КЖ-1Ар и др.

Рассмотрим в общих чертах устройство основных частей многоступенчатых воздушных компрессоров.

**Станины** отливают из серого чугуна марки СЧ 18-36. На фундаменте станина тщательно выверяется и крепится фундаментными болтами. Болты затягиваются равномерно, под основание заливается раствор цемента. Неравномерная затяжка болтов и перекос при установке станины на фундаменте могут вызвать сильную вибрацию при работе компрессора, а иногда даже поломку станины и аварию.

**Цилиндры** I, II и III ступеней отливают из серого чугуна марки СЧ 18-36. Цилиндры имеют двойные стенки с каналами, образующими охлаждающие рубашки, в которых циркулирует вода. Цилиндры IV и V ступеней отливают из углеродистой стали марки Ст. 40 (или изготовляют из поковок). Внутрь цилиндров запрессовывают втулки из мелкозернистого перлитного чугуна. Втулки диаметром до 150 *мм* изготовляют из чугуна марки СЧ 24-44, а втулки диаметром более 150 *мм* — из чугуна марки СЧ 21-40.

Для втулок диаметром меньше 150 *мм* чугун должен иметь твердость не ниже 200, а для втулок диаметром более 150 *мм* — не ниже 180 единиц по Бринеллю. Внутреннюю поверхность втулок шлифуют. Цилиндры последних ступеней располагают для охлаждения в ванне с проточной водой. В каждой рабочей полости цилиндра имеются клапанные коробки для всасывающих и нагнетательных клапанов. В рубашках предусмотрены люки для очистки внутренних поверхностей от накипи и грязи.

**Коленчатые валы и шатуны** изготовляют коваными из углеродистой стали марки Ст. 40. Опорные шейки коленчатого вала располагаются на опорных подшипниках. Эти шейки и подшипники называются *коренными* в отличие от *мотылевых*, которые служат для передачи усилия от вала к шатуну компрессора. Иногда один подшипник выносят и устанавливают на особой стойке фундамента. Все шейки вала шлифованы. Шейки вала на роликовых подшипниках подвергают поверхностной закалке токами высокой частоты. На вал компрессора насаживают маховик*, который обеспечивает равномерность вращения вала и служит шкивом в ременной передаче со шкива электродвигателя.

В крупных компрессорах с приводом от синхронного электродвигателя роль маховика выполняет ротор электродвигателя, насаженный непосредственно на вал компрессора.

Вал расположен строго горизонтально и вращается в подшипниках свободно, но без «слабины». Шкив (маховик) должен вращаться без радиального биения и не вызывать осевых перемещений вала.

Второй конец шатуна соединен с ползуном, к которому прикрепляется шток компрессора. Корпус ползуна изготовляют из стали; к нему привертывают опорные чугунные башмаки, рабочая поверхность которых заливается баббитом.

**Подшипники** компрессора обычно отливают вместе со станиной. На рис. 5.10 показан в разрезе коренной подшипник горизонтального многоступенчатого компрессора 5Э-14/220. В корпус *2* вставлены стальные вкладыши: нижний *9*, верхний *6* и два боковых *1*. Крышка *5* прикрепляется к корпусу ввернутыми в него четырьмя шпильками *7*.

Болт *4* оканчивается внизу клином, с помощью которого регулируют положение бокового вкладыша *1*. Рым-болт *3* служит

* Кроме компрессоров, не имеющих маховика, например серии ВП.



для снятия крышки. Сбоку подшипника имеется маслоулавливающая коробка *10*.

Вкладыши с внутренней стороны облужены и залиты баббитом марки Б-16; вкладыш имеет выточки в виде «ласточкина хвоста» для закрепления слоя баббита. Между верхним и боковыми вкладышами находится набор латунных прокладок *8* для регулировки положения верхнего вкладыша по высоте. После заливки и расточки вкладыши пришабривают к поверхности шейки по краске. Смазка подается через отверстие *11* и распределяется по поверхности подшипника через имеющиеся на ней канавки. Для вкладышей шатунов вертикальных быстроходных компрессоров (с повышенной

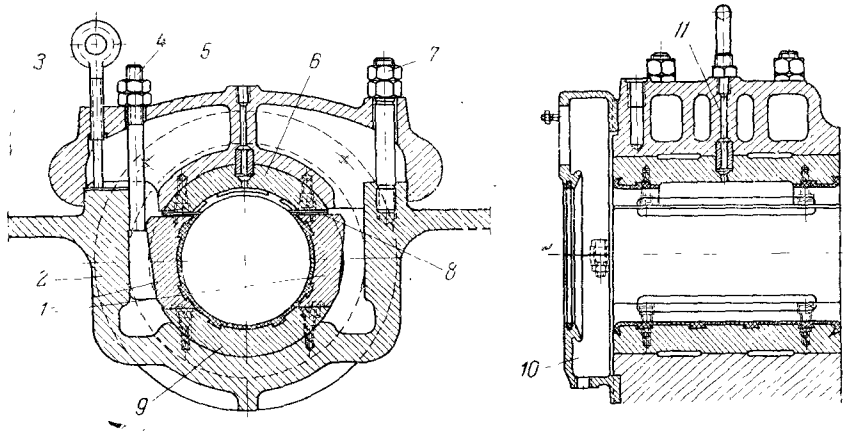



Рис. 5.10. Коренной подшипник:

*1* — боковые вкладыши; *2* — корпус; *3* — рым-болт; *4* — болт с клином; *5* — крышка; *6* — верхний вкладыш; *7* — шпильки; *8* — прокладки; *9* — нижний вкладыш; *10* — масло улавливающая коробка; *11* — отверстие для подачи смазки.

удельной нагрузкой на вкладыш) применяется баббит марки Б-83. В современных вертикальных и угловых быстроходных компрессорах применяются шариковые и роликовые подшипники качения.

**Поршни** воздушных компрессоров отливаются пустотелыми из чугуна марки СЧ 18-36. В компрессорах высокого давления поршни имеют ступенчатую форму соответственно диаметрам цилиндров компрессора. Поршень соединен гайкой со штоком. Для многоступенчатых горизонтальных компрессоров поршни изготовляют составными. Например, в компрессоре 5Э-14/220 на поршневой шток насажен общий поршень I, II и III ступеней. К нему же присоединен поршень IV ступени, который с помощью шарнирной шаровой головки связан с поршнем V ступени. Благодаря этому поршень V ступени самоцентрируется в цилиндре независимо от износа цилиндров ступеней. Диаметры поршней, как правило, меньше диаметров цилиндров на 0,5—1 *мм*. Нижняя часть поршней I ступени у крупных горизонтальных компрессоров имеет выточки, заливаемые баббитом.

Поршневые кольца располагаются в канавках, выточенны: в поршне, и служат для его уплотнения в цилиндре (рис. 5.11) Кольца выполняются разрезными и вытачиваются несколько боль шего диаметра, чем диаметр цилиндра. Вследствие упругости коль. ца плотно прижимаются к внутренней поверхности цилиндра и препятствуют пропуску сжимаемого газа в соседнюю полость ци линдра с более низким давлением. Кольца изготовляют из мел козернистого перлитного чугуна марки СЧ 21-40 для колец диа метром более 400 *мм* и марки СЧ 28-48 для колец диаметром мене 400 *мм*. Твердость колец диаметром более 400 *мм* равна 180–200 единицам, а диаметром менее 400 *мм* достигает 200—240 еди ниц по Бринеллю.

Для изготовления колец применяется перлитный чугун следую. щего состава (в %):

| | | | |
|---|---|---|---|
| Углерод | | Марганец | 0,8—1,2 |
| связанный | 0,5—0,8 | Фосфор | 0,5—0,6 |
| общий | 2,75—3,2 | Сера | 0,08 |
| Кремний | 1,3—1,8 | | |

Число колец в поршне зависит от разности давлений в соседн: полостях цилиндра, между которыми устанавливаются кольца:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Разность давлений, *кгс/см²* | До 5 | 5—30 | 30—120 | 120—350 |
| Число колец | 2—4 | 3—8 | 6—15 | 12—30 |

В месте стыка концов кольца образуется так называемый з: мок (рис. 5.12) — косой для колец небольшого диаметра и пр: мой — для колец большого диаметра.

В вертикальных компрессорах внизу каждого поршня устана: ливают маслосъемные кольца для снятия излишка масла с п: верхности цилиндра. Маслосъемное кольцо снабжено канавк: и имеет меньшую опорную поверхность, чем обычное кольцо; п: этому оно создает более высокое удельное давление на поверхнос: цилиндра.

В канавке под маслосъемным кольцом сделаны отверстия, ч: рез которые избыток масла стекает внутрь тела поршня.

В некоторых конструкциях четырехступенчатых компрессор: для поршней III и IV ступеней применяются двойные поршнев: кольца, состоящие из трех частей: одного внутреннего стально пружинящего кольца и двух наружных чугунных колец. Так: кольца хорошо уплотняют поршень в цилиндре.

В современных компрессорах, применяемых для процессов, г: нежелательно загрязнение сжимаемого газа маслом, используют: поршневые уплотнения сухого трения — из графита и из полиме: ных антифрикционных материалов.

Графитовые кольца делаются разрезными, и сжатие их ос: ществляется специальными пружинами. Они довольно быстро и: нашиваются (особенно при работе в среде осушенных и нейтра:



ных газов при больших давлениях), поэтому находят меньшее применение, чем уплотнения из полимерных материалов.

Из полимерных антифрикционных уплотнений пригодными оказались кольца из фторопласта-4 (ГОСТ 10007—62).

Фторопласт-4 (другие названия: фторлон-4, политетрафторэтилен) содержит наполнители, имеет белый или серый цвет, плотность 2,1—2,3 *г/см³*, предел прочности 160—250 *кгс/см²*, твердость 3—4 единицы по Бринеллю; он гибок, пластичен. Допустимая рабочая температура от —270 до +250 °С. Фторопласт обладает текучестью на холоду, поэтому для работы при низких температурах прокладки из него следует укладывать в паз, препятствующий вытеканию фторопласта. Характеризуется высокой химической стойкостью и низкими коэффициентами трения и теплопроводности, малым водопоглощением, диэлектрическими свойствами. К недостаткам его можно отнести: высокий коэффициент линейного расширения (в 8—15 раз выше, чем у металлов), низкую прочность и хладотекучесть при нагрузках свыше 30 *кгс/см²*. Плавится при 600 °К, разлагается при 588 °К. При разложении токсичен

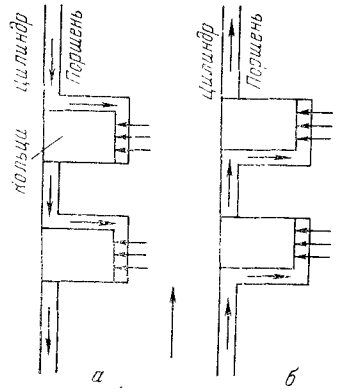



Рис. 5.11. Схема работы поршневых колец:
*а* — при ходе поршня вверх; *б* — при ходе поршня вниз.

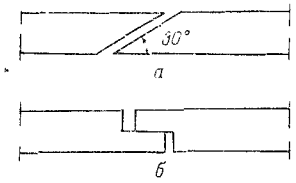



Рис. 5.12. Типы замков поршневых колец:
*а* — косой замок; *б* — прямой замок.

Для уплотнения поршней и сальников компрессоров, детандеров и жидкостных насосов разработан ряд марок антифрикционных материалов на основе фторопласта. В кислородном машиностроении используются, например, также следующие материалы:

ФН-3 (фторопласт-4 с примесью нитрида бора и никеля) — ТУ П-495—63 и РФ2-0422—63;

ФН-202 (фторопласт-4 с добавками дисульфида молибдена и никеля) — ТУ НИИПМ П-389—64;

АМИН-15М (фторопласт-4, дисульфид молибдена и ситалл) — ТУ НИИПМ П-407—65;

ФКН-7 (72% фторопласта-4; 7% дисульфида молибдена и 21% графита) — ВТУ-П — 1669;

ФКН-14 (65% фторопласта-4; 5% дисульфида молибдена, 20% графита и 10% стекловолокна) — ВТУ-П—1869.

Лучшими антифрикционными свойствами и более высокой устойчивостью против истирания обладают материалы, в состав которых введен графит и дисульфид молибдена. Для уплотнения

плунжерных пар в насосах для сжиженных газов хорошие результаты получены и при использовании чистого фторопласта-4*.

Уплотнения из фторопласта могут работать в цилиндрах из стали и чугуна, внутренняя поверхность которых обработана с чистотой ▽8—9; они непригодны для цилиндров из меди, алюминиевых сплавов и с хромированными поверхностями трения. Фторопластовые поршневые уплотнения используются для вертикальных компрессоров низкого, среднего и высокого давлений, а также для сальников и втулок. Сечение поршневых колец квадратное, делается один разрез. При большом диаметре цилиндров

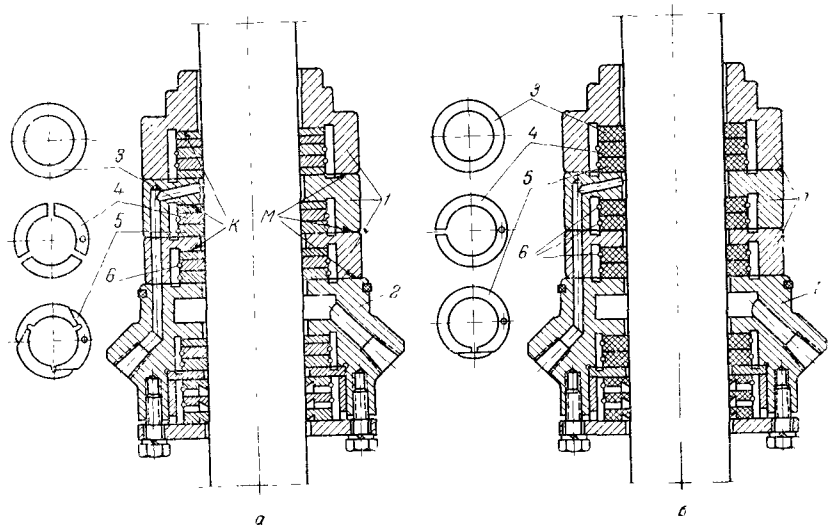



Рис. 5.13. Сальник с чугунным (*а*) и фторопластовыми (*б*) кольцами: *1* — обоймы; *2* — предсальник; *3* — дроссельное кольцо; *4* — разрезное кольцо; *5* — уплотнительное кольцо; *6* — браслетные пружины.

применяют фторопластовые кольца, состоящие из отдельных сегментов, которые, в свою очередь, снабжены разжимными (эксцентрическими) кольцами из стали или бериллиевой бронзы. В цилиндрах низкого давления фторопластовые кольца работают до 20 000 *ч*, среднего — до 8000 *ч*; в цилиндрах, рассчитанных на давление 200 *кгс/см*², — до 1500 *ч*. В детандерах на 200 *кгс/см*² продолжительность работы фторопластовых колец достигает 2500—4000 *ч*.

**Сальник** расположен в крышке цилиндра, через которую проходит поршневой шток, и служит для уплотнения штока, препятствуя утечке сжатого газа в атмосферу. В компрессорах высокого давления применяются сальники с металлической и фторопластовой набивкой.

---

* Г. А. Симонов, И. Н. Дробинин, В. В. Гриб, Кислородная промышленность, № 2, (1970).



На рис. 5.13 показан в разрезе сальник угловых компрессоров серии ВП с чугунными (*а*) и фторопластовыми (*б*) самоуплотняющимися кольцами. Сальник состоит из предсальника *2* и нескольких обойм *1*, в каждой из которых имеются чугунные неразрезные дроссельные кольца *3* и чугунные разрезные уплотнительные кольца двух типов. Кольца *4* разрезаны на три части и расположены в камерах первыми, считая от полости цилиндра. Они не устраняют проход газа в камеру, но служат для перекрытия торцовых зазоров уплотнительных колец *5*, также разрезанных на три части, но не радиально, а ступенчато. Взаимное расположение колец фиксируется штифтом для того, чтобы обеспечить постоянное перекрытие их стыков.

Каждое кольцо снаружи охватывает браслетная пружина *6*, создающая предварительное уплотнение между штоком и элементами сальника. Кольца плотно прижимаются к штоку благодаря разности давлений воздуха в камере и слое масла в зазоре между кольцами и штоком. Сальники смазываются цилиндровым маслом, подводимым под давлением от масляного насоса (лубрикатора) через каналы, имеющиеся в предсальнике *2*. Дроссельные кольца затрудняют прохождение воздуха через камеры и способствуют удержанию масла в полости сальника. Предсальник *2* служит для предупреждения попадания по штоку смазки из картера в воздушные полости цилиндров.

В сальниках с фторопластовым уплотнением кольца *4* имеют надрез по типу поршневых колец и расположены ближе к полости цилиндра. Уплотнительные кольца *5* имеют отрезной уплотняющий сегмент. Зазоры в разрезе уплотняющих колец допускают их перемещение, компенсирующее износ поверхности колец. Каждое кольцо также стягивается браслетной пружиной *6*. Дроссельное кольцо находится только в первой камере от цилиндра.

Чугунные кольца сальника изготовляют из чугуна СЧ 21-40. Поверхность штока и колец шлифуют. На рабочих поверхностях не допускается заусенцев, забоин, рисок и других дефектов. Особое значение при сборке имеет чистота поверхностей и правильное положение колец в сальнике. Торцовый зазор между обоймой и набором колец (места *K* на рис. 5.13, *а*) равен 0,05—0,12 *мм*. В собранном сальнике кольца между обоймами должны перемещаться в радиальном направлении без заедания. Поверхности *M* (рис. 5.13, *а*) притирают по плите (▽8).

**Клапаны** служат для периодического соединения рабочего объема цилиндра со всасывающим или нагнетательным трубопроводом.

В компрессорах применяются автоматические пластинчатые клапаны, работающие вследствие разности давлений до и после пластины. Разность давлений до и после клапана находится в пределах 8—12%. При всасывании давление за клапаном становится меньше давления до клапана, пружина сжимается, пластинка клапана приподнимается и воздух проходит в цилиндр.

Одна из конструкций клапанов изображена на рис. 5.14. Всасывающий и нагнетательный клапаны по конструкции одинаковы. В чугунном седле *7*, верхняя поверхность которого отшлифована, имеются кольцевые щели *8* для прохода воздуха. Щели закрыты тонкой шлифованной клапанной пластиной *9* из стали марки 30ХГСА или 20ХН4ФА. Под пластиной укреплена чугунная крышка *10*, в которую вставлены четыре пружины *4*, прижимающие пластину к седлу клапана. Между седлом и крышкой находится

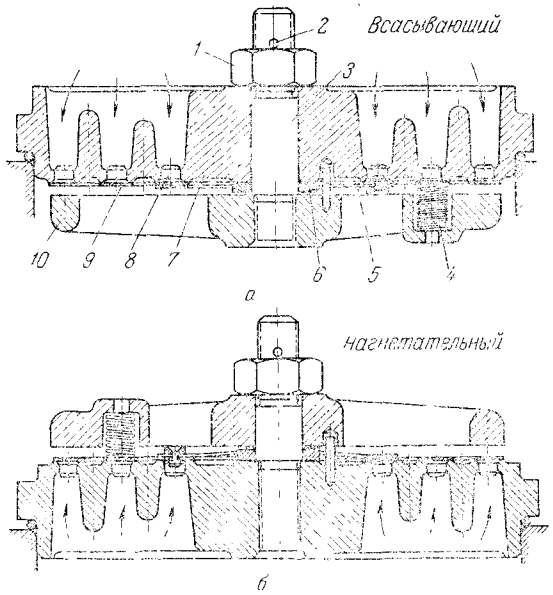



Рис. 5.14. Клапаны:

*а* — всасывающий; *б* — нагнетательный; *1* — гайка; *2* — шплинт; *3* — шпилька; *4* — пружина; *5* — пружинная пластинка; *6* — дистанционная шайба; *7* — седло; *8* — кольцевые щели; *9* — клапанная пластина; *10* — крышка.

дистанционная шайба *6*, надетая на шпильку *3* и зажатая гайкой со шплинтом *2*. Средняя часть клапанной пластины прижимается к седлу *7* пружинной пластинкой *5*.

Для обеспечения безударной работы клапана пластина *9* имеет небольшой подъем — в пределах 2—4 *мм*. Пружина клапана не должна быть слишком жесткой, так как иначе увеличится сопротивление всасывающего клапана и уменьшится коэффициент подачи компрессора. Толщина клапанной пластинки 1—2 *мм*. Скорость воздуха в клапане — не более 20—30 *м/сек*. На последних ступенях сжатия всасывающий и нагнетательный клапаны иногда объединяются в одном общем корпусе; такой клапан называется *комбинированным*.



Сталь, предназначенная для изготовления пластин клапанов, подвергается термической обработке по установленному режиму. Например, для стали 30ХГСА принят следующий режим термической обработки: нагрев до 880 °С с охлаждением в масле, затем отпуск при 450—500 °С с выдержкой в течение 1 *ч* и охлаждением на воздухе. После термической обработки пластины должны иметь твердость 37—39 единиц по Роквеллу.

Пружины клапанов изготовляют из пружинной проволоки II (ГОСТ 9389—60*), а затем их подвергают осадке с выдержкой в течение 24 *ч* в полностью сжатом состоянии при температуре 260 °С.

В современных быстроходных компрессорах широкое применение нашли беспружинные прямоточные полосовые клапаны (рис. 5.15). Пластины таких клапанов в форме тонких прямоугольных полос сами обладают пружинящими свойствами. Вследствие разности давлений полосы, прилегающие к седлу клапана и закрывающие прямоугольные окна для прохода газа, изгибаются и пропускают поток газа, после чего они вновь прикрывают окна. Эти клапаны работают бесшумно и надежно, обладают малыми потерями на дросселирование газа, долговечны и герметичны, имеют малый вредный объем, просты в изготовлении и при ремонте. Замена обычных кольцевых клапанов в цилиндрах I и II ступеней полосовыми позволяет увеличить производительность компрессора и снизить удельный расход энергии.

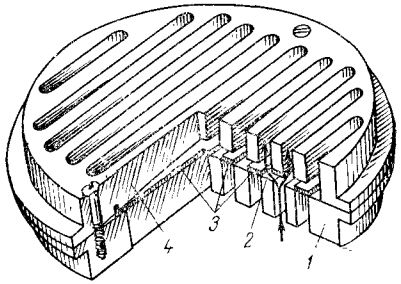



Рис. 5.15. Полосовой прямоточный клапан:

*1* — седло клапана; *2* — пластины в открытом положении; *3* — пластины в закрытом положении; *4* — ограничитель подъема.

**Холодильники** служат для охлаждения воздуха после сжатия его в цилиндрах компрессора. Обычно для I и II ступеней применяют кожухотрубные холодильники, в которых воздух проходит между трубками, а по трубкам циркулирует вода. Концы стальных трубок развальцованы в стальных трубных решетках, и между трубками сделаны перегородки для удлинения пути охлаждаемого воздуха. Одна из трубных решеток подвижная и может перемещаться при неодинаковом удлинении трубок и кожуха от нагрева во время работы холодильника. Применяются также эффективные холодильники с оребренными трубками (см. рис. 5.8 в приложении)

Для III, IV и V ступеней компрессоров используют холодильники высокого давления змеевиковые или типа «труба в трубе». Змеевик изготовляют из бесшовной стальной или медной трубы и помещают в резервуар. Для предотвращения вибрации змеевик прикрепляют хомутами к деревянным распоркам. Воздух входит в змеевик сверху, а вода в резервуар — снизу.

Холодильник типа «труба в трубе» (рис. 5.16) изготовляют и стальных труб. По внутренней бесшовной трубе *1* проходит возду а в кольцевом пространстве между ней и наружной трубой *2* - охлаждающая вода. Водяное пространство с обоих концов на ружной трубы уплотнено с помощью сальников *3* с резиновой на бивкой *4*. Трубы, по которым движется воздух, соединены коленам на фланцах. Недостатком холодильника такой конструкции являет ся трудность очистки поверхности, омываемой водой.

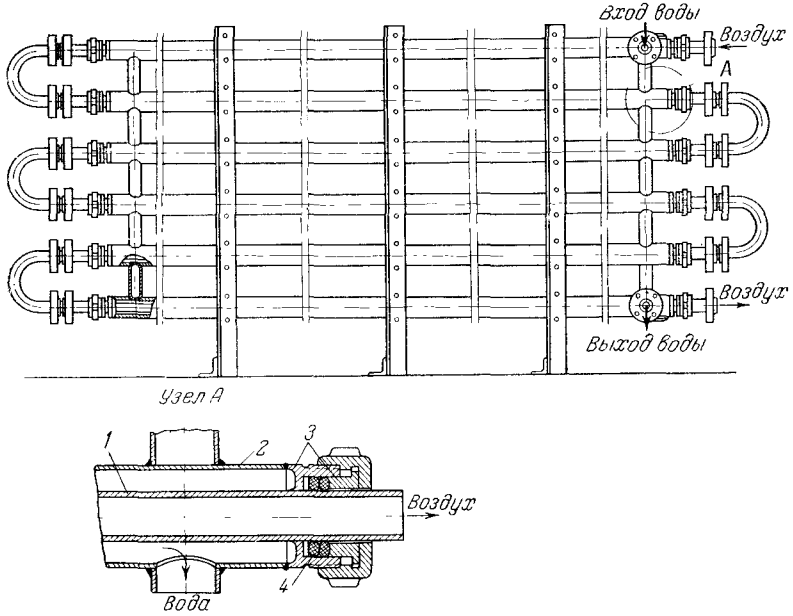



Рис. 5.16. Холодильник типа «труба в трубе»:
*1* — воздушная труба; *2* — водяная труба; *3* — сальник; *4* — резиновая набивка.

В холодильниках вода и воздух движутся противотоком. Эти достигается лучшее использование охлаждающей поверхности. Н значение холодильников — обеспечение низкой температуры сж того воздуха, что приводит к меньшей затрате энергии на рабо компрессора.

Степень охлаждения воздуха зависит не только от величины п верхности холодильника, но и от температуры охлаждающей вод и скорости протекания воздуха. Охлаждение тем лучше, чем ниж температура воды и чем больше скорость прохождения воздух Однако чрезмерно увеличивать скорость движения воздуха нельз так как при этом сильно возрастает сопротивление потока га в холодильнике, на преодоление которого нужно расходовать эне гию. Практически достаточно, если в холодильниках воздух охла дается до температуры на 10—15 *град* выше температуры атм сферного воздуха на всасывании.



Расход охлаждающей воды для многоступенчатых компрессоров составляет:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Избыточное давление сжатия, *кгс/см²* | 200 | 100 | 50 |
| Расход воды (*дм³/м³*) при разности температур воды до и после холодильника | | | |
| 15 *град* | 15—16* | 13—14 | 11—12 |
| 10 *град* | 22—24 | 19—20 | 16—17 |
| 5 *град* | 44—48 | 38—40 | 33—35 |

* Меньшие значения расхода воды относятся к компрессорам с шестью, бо́льшие—с четырьмя ступенями сжатия

Недостаточное охлаждение воздуха в холодильнике может привести к сильному нагреву его в последующих ступенях сжатия, усилить отложение нагара в клапанных коробках и трубопроводах, вызвать вспышку паров масла в компрессоре и даже взрыв холодильника.

Эффективность холодильников в значительной мере зависит от чистоты их поверхности. При загрязнении трубок холодильника накипью, маслом и нагаром резко снижается коэффициент теплопередачи поверхности холодильника. Поэтому холодильники необходимо периодически очищать от накипи, масла и нагара (см. ниже 5.3.3).

**Электродвигатели.** Для работы компрессоров используются электродвигатели трехфазного тока. Для крупных компрессоров применяют высоковольтные двигатели (6000 *в*, мощность 200 *квт* и выше). На вал электродвигателя насажен шкив для передачи вращения маховику компрессора через приводные ремни.

На современных компрессорах применяются клиновидные ремни из резины с тканевыми прокладками; это позволяет устанавливать электродвигатель ближе к компрессору, отчего вся установка становится более компактной.

Для привода более мощных компрессоров используются специальные синхронные электродвигатели. Вал такого двигателя непосредственно соединяется с коленчатым валом компрессора и одновременно служит маховиком. В крупных машинах ротор двигателя насажен на коленчатый вал компрессора, как это имеет место у воздушных компрессоров 5Э-14/220; 205ВП-16/70; 50Т-150/200 и др.

В некоторых компрессорах вал двигателя соединяется с валом компрессора посредством муфт и зубчатой передачи (редуктора). Такие приводы также надежны в эксплуатации.

Мощность электродвигателя $N_{дв}$ должна быть больше требуемой мощности на валу компрессора ($N_в$) на 10—15% для покрытия потерь в передаче. Этим учитывается также большая нагрузка двигателя в зимнее время, когда количество сжимаемого компрессором воздуха по массе больше, чем в летнее время.

## 5.3. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

### 5.3.1. Смазка компрессоров

Для уменьшения трения движущиеся части компрессора сма зываются. Соблюдение правильного режима смазки имеет важно значение для нормальной и безаварийной работы компрессора Избыток смазки так же вреден, как и недостаток ее.

При слишком обильной смазке цилиндров излишек масла отла гается на клапанах, стенках холодильников и в других местах где под влиянием высокой температуры сжатия масло разлагается окисляется и образуются углеводороды и кокс. Отложения (нагар могут способствовать дальнейшему повышению температуры сжа тия в компрессоре, что иногда приводит к взрывам масла в холо дильниках и разрушению последних. Легкие углеводороды уносят ся воздухом в кислородный аппарат, где они могут накапливаться и также явиться причиной взрывов в воздухоразделительных аппа ратах.

При недостатке смазки или использовании загрязненных сма зочных материалов увеличивается нагрев трущихся частей ком прессора, что приводит к задирам на рабочих поверхностях цилинд ров, расплавлению заливки вкладышей подшипников и, как ре зультат, к остановке компрессора на длительный ремонт или даже к аварии.

Каждый компрессор обычно имеет две раздельные системы смазки: одну для шатунно-кривошипного механизма и другую для цилиндра и сальников. В обеих системах смазка производится под давлением и масло подается к смазываемым поверхностям с помощью специальных насосов.

На рис. 5.17 показана схема смазки шатунно-кривошипного ме ханизма вертикального компрессора. Сборником масла является картер компрессора. Картер наполняется маслом через воронку *1*, а затем через приемный клапан *2* ручным шестеренчатым насо сом *3* масло подается через фильтр *4* в коллектор *5*. Из коллектора масло поступает по трубкам к коренным подшипникам *6* коленча того вала и параллелям *7* ползунов. Насос *3* служит для прокачи вания масла перед пуском компрессора. Во время работы масло подается вторым шестеренчатым насосом *8*, который приводится в движение от коленчатого вала компрессора или от небольшого электродвигателя. Этот насос засасывает масло также из картера компрессора. Давление масла в системе контролируется маномет ром *9* и может составлять 2—4 *кгс/см*².

Отработанное масло стекает обратно в картер, где отстаивает ся и охлаждается в масляном баке, состоящем из двух камер, разделенных вертикальной фильтрующей сеткой. В верхней части первой (грязной) камеры бака установлен приемный фильтр с несколькими цилиндрическими сетками для фильтрации посту пающего отработанного масла; первыми (по ходу масла) ставятся сетки с более крупными ячейками (2 *мм*), а последующие — с более



мелкими (0,5 *мм*). Во второй камере (чистой) помещен змеевик, по которому циркулирует вода, охлаждающая масло. Сверху бак закрыт плотной крышкой. Уровень масла контролируется по масломерному стеклу.

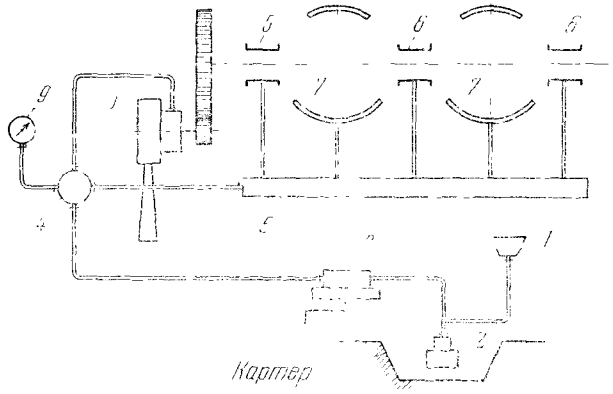



Рис. 5.17. Схема смазки шатунно-кривошипного механизма вертикального компрессора:

*1* — воронка; *2* — приемный клапан; *3* — ручной шестеренчатый насос; *4* — фильтр; *5* — коллектор; *6* — коренные подшипники; *7* — параллели; *8* — приводной шестеренчатый насос; *9* — манометр.

Для смазки шатунно-кривошипного механизма применяется индустриальное масло марки 45 (машинное С) или марки 50 (машинное СУ) по ГОСТ 1707—51. Характеристика масел приведена в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Индустриальные и турбинные масла

| | индустриальные масла марки | | | турбинные масла марки | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 45 (машинное С) | 45 (машинное С) | 50 (машинное СУ) | 22 (турбинное Л) | 30 (турбинное УТ) |
| Вязкость при 50 °С, °ВУ* | 3,8—4,6 | 5,2—7,1 | 5,8—7,9 | 2,9—3,3 | 3,5—4,5 |
| Температура вспышки, °С, не ниже | 180 | 190 | 200 | 180 | 180 |
| Температура застывания, °С, не ниже | —15 | —10 | —20 | —15 | —10 |
| Кислотность, *мг* КОН на 1 *г* масла, не более | 0,2 | 0,35 | 0,15 | 0,02 | 0,02 |
| Коксуемость, %, не более | 0,3 | 0,3 | 0,2 | — | — |
| Зольность, %, не более | 0,007 | 0,007 | 0,005 | 0,005 | 0,005 |

* Число градусов ВУ, или Энглера (°Е), по вискозиметру, представляет собой отношение времени истечения (*в сек*) 200 *см*³ испытуемого масла ко времени (*в сек*) истечения 200 *см*³ воды при 20 °С. При отсутствии вискозиметра вязкость приближенно можно определить таким способом. Две пробирки диаметром 4—5 *мм* заполняют, одну водой, вторую маслом, при этом уровни жидкости должны стоять ниже пробок на 1 *см*. Затем пробирки быстро переворачивают пробками вниз и определяют по секундомеру время подъема пузырька воздуха в каждой пробирке; отношение времени подъема пузырька в масле к времени его подъема в воде дает вязкость масла в градусах Энглера, или °ВУ.

Смазка цилиндров и сальников компрессора под давлени производится подачей масла по трубкам непосредственно на р бочие поверхности цилиндра и сальников. В качестве примера рис. 5.18 приведена одна из схем смазки. В цилиндры *I* и *II* ст

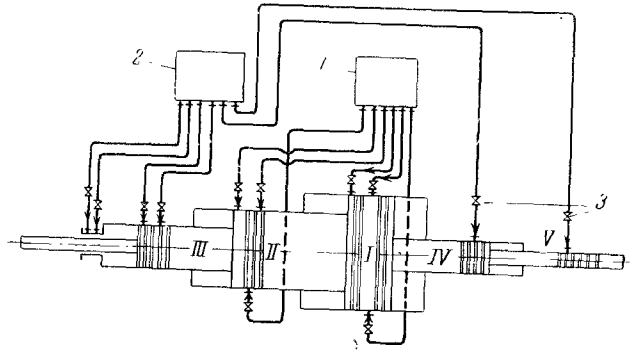



Рис. 5.18. Схема смазки цилиндров компрессора:
*1* — масляный насос низкого давления; *2* — масляный насос высокого давления; *3* — обратные клапаны; *I, II, III, IV* и *V* — ступени компрессора.

пеней смазка подается масляным насосом *1* низкого давлени а в цилиндры III, IV и V ступеней и сальник III ступени — ма ляным насосом *2* высокого давления (лубрикатором). На маслопр водах перед цилиндрами уст новлены обратные клапаны

На рис. 5.19 показан разр масляного насоса высоко давления (лубрикатора). Плу жер *2* находится в корпусе ; он получает движение от к лачкового вала *9*, кривошип *1*

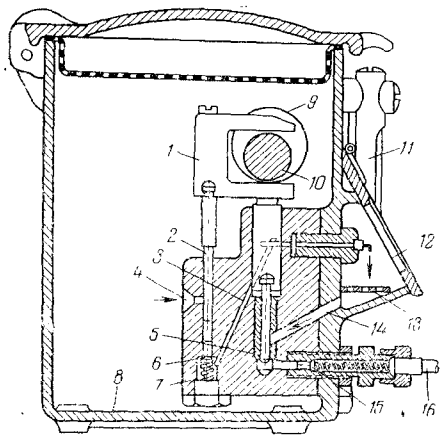



Рис. 5.19. Масляный насос высоко давления:
*1* — вилка, *2, 5* — плунжеры; *3, 14* — к налы; *4* — отверстие для входа мас *6, 15* — клапаны; *7* — корпус; *8* — рез вуар для масла; *9* — кулачковый в *10* — кривошип; *11* — масломерное ст ло; *12* — коробка; *13* — сетка; *16* — труб

которого входит в вилку *1*. При подъеме плунжера масло из р зервуара *8* поступает в отверстие *4* и выдавливается через кл пан *6* в канал *3* и коробку *12*. Пройдя через сетку *13*, масло н каналу *14* поступает под второй плунжер *5*, которым через кл пан *15* выдавливается в трубку *16*, ведущую к смазываемому мест



Кулачковый вал приводится во вращение рычажком, соединенным с шатунно-кривошипным механизмом компрессора или с отдельным небольшим электродвигателем. Перед пуском компрессора масло можно прокачивать насосом вручную. Число корпусов и плунжеров соответствует числу смазываемых точек. На каждую точку имеется отдельный комплект корпусов и плунжеров. Для наблюдения за уровнем масла в резервуаре установлено масломерное стекло *11*.

Смазка цилиндров и сальников воздушных поршневых компрессоров высокого давления для воздухоразделительных установок производится маслом П-28, маслом К-28 или маслом брайтсток. Эти масла обладают стойкостью к окислению (стабильностью) при высоких температурах и давлениях сжатия и малой склонностью к нагарообразованию. Ниже приводится техническая характеристика масел для смазки цилиндров и сальников воздушных компрессоров воздухоразделительных установок:

| Масло | 19 (Т) | КС-19 | П-28 | К-28 | Брайтсток |
|---|---|---|---|---|---|
| | ГОСТ 1861—54 | ГОСТ 9243—59 | ГОСТ 6480—53* | ТУ 38-1-6—68 | |
| Вязкость кинематическая при 100 °С, *сст* | 17—21 | 17—21 | 26—30 | 26—30 | 18—22 |
| ° ВУ | 2,4—3,0 | 2,4—3,0 | 3,68—4,20 | 3,68—4,20 | 2,6—3,2 |
| Кислотность, *мг* КОН на 1 *г* масла | 0,10 | 0,02 | 0,10 | 0,04 | — |
| Стабильность, % осадка после окисления, не более | 0,02 | 0,005 | — | 0,01 | 0,005 |
| Зольность, % | 0,010 | 0,005 | — | — | 0,005 |
| Температура вспышки, °С, не менее | 242 | 270 | 285 | 275 | 260 |
| Содержание механических примесей, % | | 0,007 | Отсутствуют | | |
| | | При давлении до 200 *кгс/см²* | | | |
| Применение | В зимнее время | При умеренной температуре | Не ограничивается | | |

Стабильность масла П-28 не регламентируется. Масло КС-19 селективной очистки из сернистых нефтей и масло 19(Г) могут применяться только при температуре в конце сжатия до 150—160 °С. Коксуемость масла К-28 не более 0,06%, осадок после окисления 0,012, температура застывания не выше минус 10 °С. Масла должны быть безводными.

Применение для смазки цилиндров компрессоров воздухоразделительных установок других масел недопустимо, так как возможно образование в цилиндрах компрессора продуктов термического разложения и накопление их в воздухоразделительном аппарате.

В установках производительностью 30—130 *м³/ч* расходуется компрессорного масла примерно 3—4 *г*, а машинного масла 2—3 *г* на 1 *м³* кислорода.

Подача масла регулируется либо изменением хода плунжера насоса путем соответствующей установки винта-толкателя, либо изменением числа оборотов вала насоса перестановкой на соответствующее отверстие рычага, служащего для привода насоса от шатунно-кривошипного механизма, или изменением числа оборотов электродвигателя маслонасоса.

В насос периодически доливают масло и тщательно предохраняют его от попадания грязи. Промывку насоса, а также промывку и продувку маслопроводов производят не реже одного раза в шесть месяцев.

Примерные нормы подачи масла в цилиндры компрессора приведены в табл. 5.3.

Таблица 5. 3. **Нормы подачи масла в цилиндры компрессора, *г/ч***

| Компрессоры | Ступени сжатия | | | | | Сальники | Всего |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | III | IV | V | | |
| Вертикальный 2Р-3 220 | 40 | 30 | 25 | 20 | | 35 | 150 |
| Горизонтальный 5Г-14/220 | 85 | 70 | 40 | 30 | 15 | 80 | 320 |
| Горизонтальный 3Г-100/200 | 150 | 150 | 150 | 320 | 320 | 400 | 1170 |
| Угловой 205ВП-16/70 | 31 | 18 | 9 | 12 | — | 2×15 | 100 |

Минимальную норму расхода масла для смазки цилиндров и сальников в зависимости от величины смазываемой поверхности можно определить по формулам, приведенным в гл. 14.5.

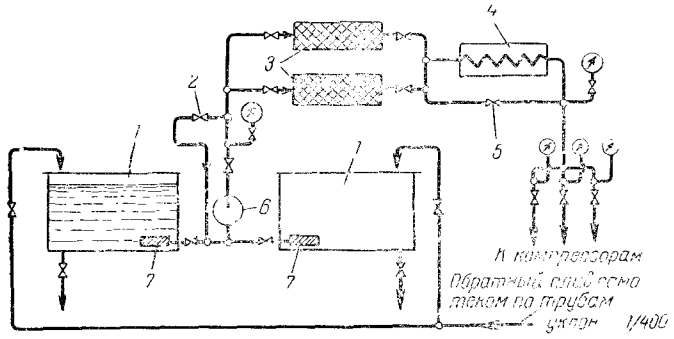



Рис. 5.20. Схема циркуляционной централизованной смазки:
*1* — баки для масла; *2, 5* — обводные вентили; *3* — масляные фильтры; *4* — холодильник масла; *6* — масляный центробежный насос; *7* — фильтры грубой очистки масла.

Отделение капель масла и влаги от потока газа происходит в цилиндрических масло-влагоотделителях с тангенциальным вводом газа и устройством против дополнительного уноса жидкости потоком газа. При расходе газа до 1500 *м³/ч* (отнесенных к рабочим условиям) скорость потока газа на входе должна быть 15—20 *м/сек*; отношение диаметра входной трубы к диаметру



сосуда отделителя равно 5 и отношение высоты сосуда к его диаметру — 4. В этих условиях отделяется 80—95% содержащихся в газе капельных жидкостей.

В крупных воздухоразделительных цехах с большим количеством компрессоров применяются системы циркуляционной централизованной смазки механизмов движения компрессоров (рис. 5.20). В сочетании с установками для регенерации масла такие системы дают значительную экономию смазочных масел и обеспечивают надежность смазки.

### 5.3.2. Обслуживание компрессоров

**Подготовка к пуску.** При подготовке компрессора к пуску машинист должен предварительно проверить надежность крепления всех частей компрессора, в том числе коренных подшипников, станины, маховика, и убедиться в отсутствии на приводных ремнях расклеившихся мест, разрывов и т. п. В компрессорах с клиноременной передачей следует проверить равномерность натяжения всех ремней и их состояние.

Затем проводят следующие операции:

а) открывают продувочные вентили маслоотделителей воздушного компрессора и щелочеотделителей декарбонизатора*;

б) открывают обводной вентиль декарбонизатора и вентили манометров; проверяют уровень раствора в декарбонизаторе, открыв для этого контрольный вентиль, и убеждаются, что декарбонизатор заполнен щелочным раствором;

в) проверяют уровень смазочного масла в резервуарах сборников и масляных насосов высокого давления, а также исправность действия всех смазывающих механизмов, для чего прокачивают масляный насос вручную и убеждаются в поступлении масла в каждую точку смазки; проверку производят, открывая контрольные краны на обратных клапанах маслопроводов;

г) проверяют, достаточно ли смазки в лубрикаторах, резервуаре шестеренчатого насоса, тавотницах, подшипниках с кольцевой смазкой, а также очищены ли маслофильтры;

д) поворачивают вручную на 1,5—2 оборота маховик компрессора и убеждаются, что ходу поршня и вращению маховика ничто не мешает;

е) убирают посторонние предметы, находившиеся около компрессора, протирают компрессор и площадку возле него;

ж) проверяют, опущены ли щетки электродвигателя на контактные кольца и включено ли сопротивление пускового реостата;

з) проверяют показания электроизмерительных приборов;

и) пускают охлаждающую воду в рубашки цилиндров, в холодильники и убеждаются в достаточном поступлении воды ко всем охлаждаемым частям компрессора;

* В установках со щелочной очисткой воздуха от $CO_2$.

к) в крупных компрессорах, работающих с синхронным электродвигателем, для облегчения запуска отжимают всасывающие клапаны I ступени компрессора с помощью отжимного приспособления.

**Пуск.** Перед пуском компрессора машинист должен предупредить об этом аппаратчика и всех находящихся в цехе и, только убедившись, что около движущихся частей компрессора никого нет, включить электродвигатель.

Когда вал компрессора получит нормальное число оборотов необходимо:

а) проверить действие масляных насосов и других смазочных приспособлений, отсутствие в них пропусков масла, отрегулировать подачу масла в соответствии с установленными нормами смазки (при пуске компрессора насос должен создавать избыточное давление масла 1,5—2 *кгс/см*²);

б) приоткрыть перепускной вентиль масляного насоса, поддерживая избыточное давление масла не более 2 *кгс/см*², а когда масло разогреется, прикрыть перепускной вентиль;

в) проверить показания манометров и исправность действия предохранительных клапанов путем их продувки;

г) убедиться в отсутствии стука в шатунно-кривошипном механизме, цилиндрах и подшипниках, а также в нормальной подаче и сливе охлаждающей воды в компрессоре;

д) включить в работу скрубберы и щелочные насосы.

Только убедившись в исправном действии масляной и охлаждающей систем и отсутствии стука в машине, можно начать нагружать компрессор, закрывая продувочные вентили маслоотделителей последовательно по ходу воздуха, начиная с I ступени, а затем закрыть продувочные вентили водоотделителей декарбонизаторов. Когда давление в ступени компрессора, включенной после декарбонизатора, будет выше, чем давление до декарбонизатора, можно начать медленно закрывать обводной вентиль декарбонизатора и сообщить аппаратчику, что компрессор готов к эксплуатации.

Подачу воздуха от параллельно работающих воздушных компрессоров в сеть начинают тогда, когда конечное давление сжатия в них будет равно давлению в коллекторе.

**Обслуживание во время работы.** При работе воздушного компрессора обслуживающий персонал должен:

1) следить за действием смазочных механизмов и своевременно добавлять масло в масляные насосы, масленки и подшипники. избыточное давление масла после шестеренчатого масляного насоса должно быть в пределах 2—4 *кгс/см*², в противном случае необходимо отрегулировать маслоподающий клапан; масло в циркуляционной системе рекомендуется менять через каждые 2000—2500 *ч* работы, а в новых компрессорах чаще;

2) проверять, не нагреваются ли параллели, пальцы ползунов, подшипники шатунов, коренные и выносные подшипники; особое



внимание следует обращать на работу подшипников, имеющих кольцевую смазку, проверяя вращение колец и температуру подшипников; нельзя допускать нагревания трущихся частей компрессора выше 60 °С; в случае более высокого нагрева этих частей следует немедленно остановить компрессор, установить и устранить причину нагрева*;

3) следить за температурой обмотки электродвигателя и его подшипников: температура масла после маслохолодильника не должна превышать 40—45 °С, после подшипников 65 °С;

4) контролировать температуру сжатого воздуха после каждой ступени компрессора; в случае повышения температуры воздуха в конце сжатия в какой-либо ступени компрессора до 190 °С проверить подачу охлаждающей воды и ее температуру, а также давление в ступенях компрессора; если снизить температуру сжатия путем увеличения подачи охлаждающей воды невозможно, надо остановить компрессор, проверить плотность всасывающего клапана следующей ступени и состояние холодильника предыдущей ступени; необходимо следить за подачей в компрессор охлаждающей воды, проверять ее температуру через каждый час; при нормальной работе холодильников разность температур выходящего воздуха и поступающей воды не должна превышать 10 *град;*

5) следить за давлением сжатия в цилиндрах компрессора; при отклонении давлений от нормальной величины для данной ступени компрессора остановить компрессор и проверить плотность соответствующих клапанов и при необходимости уплотняющих колец цилиндров; компрессор с неисправными клапанами эксплуатировать нельзя;

6) наблюдать за состоянием ременной передачи, предотвращать загрязнение ремней маслом, водой, пылью; не допускать сильного проскальзывания ремней; в случае необходимости, остановив предварительно компрессор, увеличить натяжение ремней;

7) следить за состоянием и герметичностью предохранительных клапанов компрессора, продувать их не реже одного раза в смену;

8) регулярно продувать масло-влагоотделители, так как переполнение их жидкостью нарушает нормальную работу компрессора и может привести к аварии; продолжительность продувки не должна превышать нескольких секунд; окончание продувки можно определить на слух по шуму, который резко изменяется, как толь-

---

* Контроль за степенью нагрева трущихся деталей компрессора можно вести с помощью термокраски, которая при 60—65 °С приобретает красный цвет, а при температуре свыше 65 °С переходит в темно-фиолетовый. Термокраску приготовляют следующим образом. Растворяют 450 *г* иодистой ртути HgJ и 350 *г* иодистого калия KJ в 3 *дм*³ воды. Затем растворяют 315 *г* сернистой меди $CuSO_4$ в 300 *см*³ воды. Оба раствора сливают в один сосуд при непрерывном помешивании и дают отстояться, после чего сливают жидкость, а осадок фильтруют и высушивают. Полученный порошок разводят на чистой натуральной олифе. Готовые термочувствительные краски (ТУ ЯН-25—58) выпускает Рижский лакокрасочный завод.

ко из трубки перестает идти вода и начинает выходить возду масло-влагоотделитель I и II ступеней следует продувать чаш

9) регулярно протирать компрессор и все его части, подде живать чистоту вокруг него.

**Остановка компрессора.** Перед остановкой компрессора необх димо открыть обводной вентиль декарбонизатора, а также в продувочные вентили блоков осушки и масло-влагоотделител компрессора. После этого можно выключить электродвигатель.

Спустя 10—15 *мин* после остановки компрессора следует пр кратить подачу охлаждающей воды и остановить щелочной насо затем проверить степень нагрева всех движущихся частей и по шипников, состояние приводного ремня и протереть компрессо

В случае необходимости срочной (аварийной) остановки ко прессора нужно выключить электродвигатель и немедленно откры все продувочные вентили для выпуска воздуха из системы и сн жения в ней давления.

**Возможные неполадки в работе компрессора.** К основным неп ладкам относится неправильное распределение давл ний между отдельными ступенями сжатия компрессора. Пов шение степени сжатия в цилиндре называется *перегрузо* а понижение — *недогрузом.* Степень сжатия в каждой ступе компрессора зависит от работы предыдущих и последующ цилиндров.

Ниже приведены наиболее характерные признаки, указывающ на нарушение правильности распределения давлений по ступен компрессора, а также причины, вызывающие эти нарушения.

1. Степень сжатия I ступени понижается, а последующих — повышает Сопутствующими признаками являются: снижение производительности компр сора и нагрев всасывающей трубы и крышки клапана I ступени. Причина пропуск во всасывающем клапане I ступени, вследствие чего часть нагрето воздуха уходит обратно в атмосферу, а остальной газ поступает во II и пос дующие ступени с меньшим начальным давлением.

2. При том же изменении степени сжатия, сопровождающимся снижени производительности компрессора, происходит повышение температуры газа по I ступени. Причина — пропуск в нагнетательном клапане I ступени, вследст чего в цилиндр I ступени поступает часть нагретого воздуха из нагнетательно трубопровода между I и II ступенями.

3. Помимо снижения производительности компрессора и указанного вы изменения степени сжатия часть воздуха выходит через сапун картера (в верт кальных компрессорах). Причина — негерметичность поршневых колец цил дра I ступени.

4. Незначительное изменение степени сжатия воздуха во всех ступен компрессора и постепенное ее возрастание, сопровождаемое снижением произ дительности компрессора. Причина — пропуск в поршневых кольцах цилинд последней или одной из промежуточных ступеней компрессора.

5. Степень сжатия в одной из ступеней компрессора понижается, а в пред дущей — повышается, но при этом производительность компрессора прак чески не изменяется. Если нагревается всасывающая труба или крышка всас вающего клапана той ступени, в которой имеется недогруз, то это означает, ч пропускает всасывающий клапан данной ступени.

6. При тех же изменениях степени сжатия, но без понижения производ тельности компрессора повышается температура за цилиндром той ступени, в которой степень сжатия снизилась. Причина — пропускает нагнетательный клапан той ступени, где имеется недогруз, так как в цилиндр этой ступени поступает не только нормально засасываемый воздух, но и воздух, проникающий через негерметичный нагнетательный клапан.



Определить причину неправильного распределения давлений между цилиндрами компрессора можно по следующим признакам:

а) перегруз, возникающий вследствие неисправности поршневых колец, в отличие от перегруза, вызываемого неисправностью клапанов, обычно невелик и возрастает постепенно, иногда в течение нескольких недель;

б) при пропуске всасывающего клапана нагревается всасывающая труба или крышка клапана той же ступени, так как через негерметичный клапан выталкивается обратно в трубу горячий сжатый воздух;

в) при пропуске нагнетательного клапана повышается температура в конце сжатия, что легко заметить по показаниям термометра на нагнетательной трубе;

г) резкий перегруз в цилиндре последней ступени, что создает препятствие выходу сжатого воздуха из компрессора (иногда предохранительные клапаны при этом не срабатывают). В этом случае, грозящем аварией, машинист обязан немедленно остановить компрессор и срочно выяснить причину перегруза.

Во всех случаях неправильного распределения давлений между цилиндрами компрессора, вызванных неисправностью клапанов, компрессор останавливают, дефектный клапан осматривают и разбирают. При этом следует проверить, не сломалась ли пластина или пружина, не отвернулся ли винт, прижимающий клапан к гнезду через уплотнительную прокладку, исправна ли прокладка. Иногда некоторое повышение давления вызывается негерметичностью соединения розетки и седла всасывающего клапана.

В случае попадания постороннего тела под пластину клапана (например, кусочка пластины при ее поломке) необходимо проверить, нет ли повреждения на поверхности седла клапана. В самом клапане могут возникнуть следующие неполадки:

а) негерметичное перекрытие седла клапана пластиной вследствие ее коробления (это легко обнаружить, заполнив клапан водой или керосином);

б) заедание пластины в направляющих выступах;

в) образование раковин, углублений или рисок на уплотнительных поясках седла клапана;

г) ослабление или поломка пружины клапана;

д) слишком большой подъем клапанной пластины;

е) трещина в пластине клапана или на его корпусе.

Подшипники нагреваются вследствие недостаточной подачи смазки к ним, загрязнения или задира рабочей поверхности, слишком сильной затяжки и т. п. Перегретый подшипник следует снять после его остывания, разобрать и осмотреть вкладыши. Если рабочая поверхность вкладыша неравномерно покрыта бликами «приработки», его необходимо пришабрить к шейке вала; смазочные канавки должны быть очищены от наплывов баббита. Если шейка вала имеет риски или царапины, ее нужно тщательно зачистить. Отверстия для подачи смазки промывают керосином и продувают. Если масло загрязнено, его заменяют. При этом пред-

Таблица 5.4. **Стуки в компрессоре и способы их устранения**

| Характер стука | Вероятная причина | Способы устранения |
|---|---|---|
| **В цилиндровой группе** | | |
| Резкий односторонний стук, возникающий при ходе поршня только в одну сторону | Попадание твердых металлических частиц во вредное пространство цилиндра | С помощью крючков удалить через клапанные окна из вредного пространства смазку, содержащую металлические частицы. Поршень при этом должен находиться на расстоянии 5—10 *мм* от мертвой точки |
| То же | Недостаточный объем вредного пространства | Проверить с помощью свинцовой проволоки через клапанные окна величину линейного вредного пространства и отрегулировать |
| Резкий неодинаковый стук при ходе поршня в обе стороны | Ослабление шарнирных соединений поршней | Разобрать цилиндр и перебрать соединения |
| Резкий односторонний стук, сопровождающийся треском в холодильниках | Попадание влаги или щелочи в цилиндр, излишняя подача смазки | Продуть соответствующие полости цилиндра и холодильника |
| Слабый стук | Чрезмерный подъем клапанной пластины | Уменьшить подъем пластины, изменить положение упора |
| **В кривошипной группе** | | |
| Резкий двусторонний стук, возникающий при ходе поршня в обе стороны | Ослабление соединения штока с ползуном | Подтянуть крепление |
| Резкий двусторонний стук | Разработка подшипника или ослабление крепления пальца ползуна | Проверить цилиндричность пальца и при необходимости прошлифовать его. С помощью краски проверить смятие гнезд пальца |
| | Увеличение зазора между башмаками и направляющими ползуна | Проверить щупом величину зазора. В случае необходимости уменьшить зазор, увеличив число прокладок под башмаки |
| Глухой или, наоборот, резкий стук, сопровождаемый биением маховика | Неправильная посадка маховика на вал | Правильно насадить маховик, проверить точность посадки и отсутствие биения |
| Глухой стук, уменьшение давления масла в системе смазки подшипников | Выработка коренного или кривошипного подшипника, либо ослабление их затяжки | Перебрать и перетянуть подшипник. Для кривошипного подшипника подобрать число прокладок так, чтобы при затяжке болтов до отказа шатун не падал под действием собственного веса; при последующем отвертывании гаек до половины их граней шатун должен упасть. Найденное положение гаек отметить, а затем, меняя прокладки, добиться того же положения при завинчивании гаек до отказа |

*Продолжение*

| Характер стука | Вероятная причина | Способы устранения |
|---|---|---|
| Те же признаки, но сопровождаемые заеданием подшипника при проворачивании вала | Разработка шейки вала или кривошипа | Прошлифовать дефектную шейку |

варительно промывают фильтр масляного насоса. При сборке подшипника болты затягиваются равномерно.

Стук в компрессоре может быть различным и вызываться рядом причин. Наиболее частые причины возникновения стука, а также способы его устранения указаны в табл. 5.4.

Перечень некоторых повреждений и неполадок, встречающихся при эксплуатации компрессоров, приведен в табл. 5.5.

Персонал, обслуживающий компрессор воздухоразделительной установки, должен знать особенности каждого компрессора, так как изготовление компрессоров (особенно крупных) на машиностроительных заводах производится мелкими сериями и каждая машина может иметь свои особенности. В процессе работы следует производить доводку компрессора для получения наилучших показателей в заданном режиме.

Особенности конструкции и правила эксплуатации компрессоров описаны также в заводских инструкциях по обслуживанию и ремонту этих машин. Эти инструкции должны быть хорошо изучены персоналом, обслуживающим компрессор.

К поршневым компрессорам для воздухоразделительных установок предъявляются дополнительные требования. Эти компрессоры должны: надежно и безотказно работать в условиях непрерывной длительной эксплуатации; обеспечивать минимальную температуру воздуха в конце сжатия и в наименьшей степени загрязнять воздух примесями масла и продуктов его разложения; иметь эффективно действующие воздухоохладительные устройства и масло-влагоотделители после каждой ступени сжатия, в том числе и последней ступени; работать с высоким изотермическим коэффициентом полезного действия.

К компрессорам для передвижных установок предъявляется ряд специальных требований, вытекающих из условий эксплуатации установок на транспортных средствах, в первую очередь, — компактность и небольшой вес.

При использовании для комплектации воздухоразделительных установок воздушных компрессоров общего назначения необходимо, в первую очередь, обращать внимание на конечные температуры сжатия в ступенях компрессора. Эти температуры не должны пре-

Таблица 5.5. **Возможные повреждения компрессора и неполадки в работе**

| Характер повреждения или неполадки | Причина | Способы предупреждения и устранения |
|---|---|---|
| Негерметичность сальника | а) Износ уплотнительных колец<br>б) Поломка пружин<br>в) Повреждение прокладки между первым стаканом и крышкой цилиндра<br>г) Износ штока или образование рисок на его поверхности | Заменить дефектные элементы, проверить подачу смазки; предохранить шток от попадания пыли: пропитать прокладку цилиндровым маслом, смешанным с графитом |
| Поломка клапана | а) Возникновение гидравлического удара в компрессоре<br>б) Слишком плотная пригонка клапана к седлу<br>в) Образование трещин на пластинах | а) Регулярно продувать масло-влагоотделители<br>б) Оставлять в клапанах зазор для температурного расширения<br>в) Тщательно контролировать качество пластин |
| Искривление вала | а) Возникновение гидравлического удара в компрессоре<br>б) Ослабление болтов одного из коренных подшипников<br>в) Взрыв паров масла в цилиндрах | а) Регулярно продувать масло-влагоотделители<br>б) Проверить правильность затяжки подшипников<br>в) Применять масло надлежащего сорта и наблюдать за степенью сжатия |
| Поломка поршневых колец | а) Образование трещин в кольцах при неумелом их надевании на поршень<br>б) Применение колец из недоброкачественного материала | а) Использовать при надевании колец подкладки толщиной не более 1—1,5 *мм*<br>б) Сменить кольца |
| Попадание в цилиндр щелочи из декарбонизатора | Порча обратного клапана декарбонизатора или пуск и остановка компрессора при закрытом обводном вентиле | Соблюдать правила пуска и остановки компрессора при работе с декарбонизатором |
| Износ трущихся поверхностей цилиндра | а) недостаточная подача смазки<br>б) Применение поршневых колец из металла более твердого, чем металл цилиндра<br>в) Попадание в цилиндр твердых механических частиц | а) Подавать в цилиндры масло по норме, установленной в инструкции<br>б) При выборе поршневых колец учитывать, что твердость металла на поверхности цилиндра должна быть выше твердости поршневых колец на 25—30 единиц по Бринеллю<br>в) Тщательно наблюдать за работой воздушных фильтров |



*Продолжение*

| Характер повреждения или неполадки | Причина | Способы предупреждения и устранения |
|---|---|---|
| Образование нагара на клапанах и в холодильниках | а) Применение смазочного масла неподходящего качества или подача его в излишнем количестве<br>б) Повышение степени сжатия воздуха и недостаточное охлаждение воздуха в промежуточных холодильниках, что приводит к повышению температуры сжатия в цилиндрах компрессора | Соблюдать нормы смазки, применять масла установленного качества; периодически промывать или снимать нагар латунным шабером; улучшить работу холодильника (очистить от нагара и накипи, увеличить поверхность, снизить температуру охлаждающей воды); выявить причину и устранить неправильное распределение степеней сжатия между цилиндрами компрессора |
| Скопление масла в нагнетательном трубопроводе | а) Излишняя подача масла в цилиндры<br>б) Попадание смазки из механизма движения на стенки цилиндра | Уменьшить подачу масла |
| Недостаточное количество смазки на стенках цилиндра I ступени и усиленный износ поршневых колец | а) Повышение влажности засасываемого воздуха<br>б) Попадание во всасывающий трубопровод атмосферной влаги или водяных брызг<br>в) Неисправность в системе подачи смазки<br>г) Недостаточная твердость чугуна, из которого изготовлены поршневые кольца | Устранить выявленные причины; применять более вязкое масло; заменить кольца |
| Негерметичность обратных клапанов на маслопроводах для смазки цилиндров | Притупление острой кромки седла обратного клапана маслопровода | Проточить седло |
| Неисправность в системе циркуляционной смазки | а) Порча манометра<br>б) Вследствие поломки какой-либо части (например, шестерен привода, шпонки валика насоса, пружины перепускного клапана) или разрыва маслопровода отказал шестеренчатый насос | а) Остановить компрессор и сменить манометр<br>б) Немедленно остановить компрессор и сменить насос |

*Продолжение*

| Характер повреждения или неполадки | Причина | Способы предупреждения и устранения |
|---|---|---|
| Неисправность в системе циркуляционной смазки | в) Понижение уровня масла | в) Долить масло в картер |
| | г) Разработались вкладыши подшипников | г) Отремонтировать подшипники |
| | д) Появление пропусков в маслопроводе | д) Устранить утечку при первой остановке или, если возможно, на ходу |
| | е) Засорение приемной сетки насоса или фильтра | е) Промыть фильтр бензином с последующей обдувкой воздухом |
| | ж) Понижение вязкости масла вследствие перегрева | ж) Проверить степень охлаждения масла |
| Неисправности системы охлаждения | | |
| а) образование накипи | а) Повышение жесткости охлаждающей воды | а) Очистить холодильники от накипи механическим или химическим путем |
| б) нарушение герметичности системы | б) Нарушение развальцовки труб; вытекание воды из сливной трубы толчками вследствие прорыва прокладки | б) Устранить неплотности в системе |

вышать допустимых пределов, при которых еще не происходит разложение масла в цилиндрах и загрязнение сжимаемого воздуха взрывоопасными примесями (см. гл. 14).

### 5.3.3. Ремонт компрессоров

**Общие сведения.** Осмотр компрессоров, устранение отдельных дефектов и их текущий ремонт можно производить при кратковременных остановках во время отогревания воздухоразделительного аппарата.

В период капитального ремонта производят полную разборку компрессора и проверку состояния его основных частей. При этом вынимают поршни из цилиндров и снимают коленчатый вал. Разбираемый узел предварительно промывают керосином для удаления масла и грязи, детали тщательно протирают.

Детали снимают осторожно во избежание их повреждения, используя ключи соответствующего размера, выколотки и кувалды из меди и латуни, съемники и прочие приспособления. Снятые детали укладывают в определенном порядке на чистые стеллажи, фанерные или картонные листы и прикрывают сверху листом чистого картона или плотной бумаги для предохранения от загрязнения. Отверстия отъединенных трубок заглушают деревянными пробками или концы трубок обертывают бумагой и обвязывают. На время



перерыва в работе разобранную машину накрывают чистым брезентом.

При отвертывании гаек каждую из них вначале равномерно ослабляют, а затем уже отвертывают. После снятия детали отвернутую гайку вновь навертывают на болт или на шпильку. Снятые гайки надевают на проволоку и хранят в ящиках. Детали промывают керосином в чистых ванночках из оцинкованного железа. После снятия уплотняющих прокладок остатки их тщательно удаляют с детали, а риски и канавки на ее поверхности прочищают. Шпонки вновь вставляют в шпоночную канавку снятого валика и закрепляют мягкой проволокой или шпагатом. Регулировочные прокладки хранят отдельно, завернутыми в бумагу. Гайки и болты затягивают постепенно и равномерно, поворачивая гайки на одинаковый угол на диаметрально противоположных сторонах закрепляемой детали. Вращающиеся детали после затяжки гаек проверяют вручную на свободное вращение. При сборке ставят новые шплинты, замки и прочие крепежные детали.

Сборку следует производить тщательно, следя за тем, чтобы в детали не попадала грязь.

Трущиеся части компрессора необходимо периодически осматривать для выявления степени их износа, наличия трещин, задиров или волокон, вмятин, забоин, выкрашивания рабочего слоя, ржавления и прочих дефектов, могущих вызвать остановку или поломку компрессора. В зависимости от характера и размеров обнаруженных дефектов мастер решает вопрос о допустимости дальнейшего использования данной детали.

О величине износа судят по результатам обмера деталей, наличию люфта в сочленениях и т. п. Трещины обнаруживают при помощи лупы с четырех-пятикратным увеличением. Наиболее опасны трещины в углах деталей, около отверстий и в местах перехода от одного сечения к другому. Особенно тщательно проверяют, нет ли трещин на коленчатом валу и его шейках, ползуне, шатуне, коренных подшипниках, станине, ответственных и сильно напряженных крепежных болтах и шпильках (например, болтах головки шатуна) и на других деталях компрессора. Задиры и наволакивания могут появиться в результате попадания на трущиеся детали грязи, отсутствия достаточной смазки, а также из-за перекоса при монтаже.

Обнаружив дефект, тщательно осматривают не только поврежденную, но и соприкасающуюся с ней деталь. Небольшие риски, задиры и царапины зачищают специальными брусками или «бархатными» напильниками, а затем самой мелкой крокусовой шкуркой, смоченной в керосине, после чего деталь промывают керосином. Применять для зачисток наждачную бумагу нельзя, так как наждак остается в порах металла и может вызвать в дальнейшем повреждение рабочей поверхности. Ржавчину с трущихся поверхностей удаляют также крокусовой шкуркой.

Обмер шеек валов, отверстий, подшипников и цилиндровых втулок производят в двух взаимно перпендикулярных плоскостных

сечениях, в трех местах: посередине и на расстоянии 15—20 *мм* от концов обмеряемого участка. Для определения овальности достаточно сделать промер в одном сечении и в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Замеры производят кронциркулем или нутрометром с точностью до 0,25 *мм*, штангенциркулем — с точностью до 0,1 или 0,2 *мм* и микрометром с точностью до 0,01 *мм*. Биение шеек вала определяют с помощью измерительного индикатора.

**Коленчатый вал и подшипники.** Неправильный монтаж компрессора, осадка фундамента, ослабление одного из подшипников могут вызвать дополнительный изгиб коленчатого вала, что может стать причиной появления трещин в наиболее нагруженных частях вала. Для своевременного выявления трещин вал периодически осматривают через лупу. Границы обнаруженной трещины отмечают кернами. Если вал с трещиной продолжает работать, то за ним устанавливают особо тщательное наблюдение и при первой возможности заменяют новым. Трещины устраняют заваркой с последующей обработкой вала.

Неправильное положение одного из подшипников может вызвать искривление вала, которое обнаруживают измерительным индикатором при медленном вращении вала. Искривление вала устраняют проточкой всех его шеек на станке. При появлении на шейках вала задиров, забоин и других дефектов их зачищают, а шейки шлифуют.

В результате неравномерного износа шейки вала принимают овальную или конусную форму. Ниже указаны нормальные и предельно допустимые (в скобках) величины овальности и конусности шеек валов (в *мм*):

| Диаметр шеек | 180—260 | 260—360 | 360—500 |
|---|---|---|---|
| Допустимая овальность и конусность шеек | | | |
| коренных | 0,03 (0,15) | 0,04 (0,20) | 0,05 (0,25) |
| мотылевых | 0,01 (0,15) | 0,05 (0,20) | 0,06 (0,25) |

При сильном износе необходимо проточить шейку, придав ей цилиндрическую форму, а затем прошлифовать. Исправный и правильно смонтированный коленчатый вал должен работать в подшипниках компрессора без колебаний. На неисправность вала указывает стук, не устраняемый подтягиванием вкладышей. В этом случае подтягивание вызывает лишь быстрый нагрев подшипников.

Продольные колебания вала могут быть вызваны биением маховика вследствие неправильной посадки его на вал, что устраняется выверкой маховика. Биение концевых шеек коленчатых валов не должно превышать 0,08 *мм*, а коренных шеек — 0,05 *мм*.

После проточки шеек вала, а также при износе или подплавлении вкладышей подшипников производят их перезаливку и пригонку. Перезаливку вкладышей делают также в том случае, если слой баббита сработан более чем на 60% его первоначальной толщины или выкрошился, потрескался и отстал более чем на $^1/_6$ поверхности вкладыша.



Из вкладышей предварительно выплавляют баббит прежней заливки, для чего нагревают вкладыши паяльной лампой или в печи до 240 °С. Расплавленный баббит удаляют также из «ласточкиных хвостов» вкладыша. Затем вкладыш тщательно очищают и обезжиривают в горячем 10%-ном растворе каустика с последующей промывкой в горячей воде. После этого внутреннюю поверхность вкладыша лудят. При заливке баббитом Б-83 лужение производят сплавом, состоящим из $^2/_3$ олова и $^1/_3$ свинца, а при заливке баббитом других марок — из $^1/_3$ олова и $^2/_3$ свинца.

Лужение производят непосредственно перед заливкой вкладыша, нанося полуду равномерным слоем толщиной не менее 0,1 *мм*. После лужения вкладыши собирают в приспособлении — стальной опорной плите, на которую уложена асбестовая прокладка. На прокладку устанавливают полуцилиндры из листовой стали толщиной 0,5—1 *мм*, образующие внутренний стержень при заливке. Полуцилиндры имеют отогнутые буртики, которые зажимают между двумя вкладышами, а вкладыши стягивают двумя кольцами. Через плиту пропущен болт, которым вкладыши с помощью планки прижимают к плите. Сверху под планку ставят опорное кольцо, служащее для образования усадочного буртика при заливке.

Перед заливкой вкладыши, собранные в приспособлении, подогревают до 250—270 °С. Необходимое количество баббита подсчитывают по объему заливки. Плотность баббита принимают следующую:

| Баббит | Б-83 | БН | Б-16 и БМ | Б-6 | БК |
|---|---|---|---|---|---|
| Плотность, *г/см³* | 7,38 | 9,55 | 9,20 | 9,6 | 10,5 |
| Температура затвердевания, °С | | | | | |
| вначале | 370 | 400 | 410 | 416 | 440 |
| в конце | 240 | 240 | 240 | 232 | 230 |

Баббит небольшими кусками кладут в тигель и расплавляют на медленном огне; при этом следят, чтобы температура баббита не превысила 480 °С, иначе он перегреется.

Расплавленный в тигле баббит размешивают стальным стержнем, а затем заливают вкладыши непрерывной, равномерной и тонкой струей. При этом следят, чтобы в заливку не попадали грязь и шлак с поверхности расплавленного баббита. Поверхность заливки после остывания должна иметь серебристый оттенок и быть чистой. Желтый цвет заливки указывает на перегрев баббита, и такой вкладыш следует залить вновь.

Залитые вкладыши вынимают из форм и плоскости их разъема зачищают напильником; собирают вкладыши в приспособлении и протачивают. Если при расточке обнаруживаются раковины, вкладыши бракуют. Последнюю проточку производят при минимальной подаче резца. Припуск на шабровку составляет не более 0,05—

0,1 *мм*. На рабочей поверхности вкладышей делают канавки для распределения и стока масла.

В начале сборки вкладыши подгоняют и пришабривают «по краске» к соответствующим местам в корпусе подшипника. Шабровку ведут до получения на сопряженных поверхностях мелких и равномерно распределенных окрашенных пятен. Количество пятен должно быть не менее трех на каждые 4—5 *см*² поверхности шабрения. Затем пришабривают вкладыши к шейкам вала шабером в разных направлениях под углом 45°. Нижний вкладыш должен по всей длине прилегать к шейке, соприкасаясь с ее поверхностью по дуге 30° в ту и другую сторону от вертикали. Пришабривание считается достаточным, если пятна краски располагаются равномерно и покрывают на менее 25—30% рабочей поверхности. После пришабривания шейку и вкладыши тщательно промывают керосином и насухо протирают.

Шабровку можно производить по оправке, изготовленной в точном соответствии с размерами шейки вала. В случае заливки баббитом Б-83 при диаметре шеек от 180 до 600 *мм* величина зазора между верхним вкладышем и шейкой вала должна составлять 0,20—0,25 *мм*, а между боковыми вкладышами и шейкой — 0,10—0,15 *мм*. При заливке баббитом Б-16 и БМ зазор между шейкой и верхним вкладышем увеличивают до 0,25—0,30 *мм* и для боковых вкладышей — до 0,15—0,20 *мм*. По мере износа баббита зазор регулируют, уменьшая число прокладок между верхним и нижним вкладышами.

После сборки подшипника вал несколько раз проворачивают. Затем подшипник разбирают, снова осматривают и, если нужно, дополнительно подшабривают.

Проверенные вкладыши и шейку вала вновь промывают керосином, обтирают, смазывают маслом и окончательно собирают подшипник. Если при туго затянутых подшипниках вал можно проворачивать вручную, то вкладыши подогнаны правильно.

**Состав баббитов для заливки вкладышей подшипников (в вес. %)**

| Баббит | Сурьма | Медь | Мышьяк | Кадмий | Олово | Свинец |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Б-83 | 10—12 | 5,5—6,5 | — | — | Остальное | — |
| БМ | 10—11 | 1,3—1,5 | 1,1—1,2 | 1,1—1,2 | 10,5—11,5 | Остальное |
| БН* | 13—15 | 1,5—2,0 | 0,5—0,2 | 1,25—1,75 | 9—11 | » |
| Б-16 | 15—16 | 1,5—2,0 | — | — | 15—17 | » |
| Б-6 | 14—16 | 2,5—3,0 | 0,6—1,0 | 1,75—2,25 | 5—6 | » |
| БК** | 0,5 | | В сумме 0,5 | | | » |

* Содержание никеля в баббите БН составляет 0,75—1,25%.
** Баббит БК содержит также кальций и натрий, соответственно 0,8—1,1 и 0,75—1%.

Баббит марки Б-83 применяется только для заливки вкладышей подшипников турбокомпрессоров, быстроходных компрессоров и шатунов. В поршневых компрессорах, работающих с малой удельной нагрузкой на вкладыши, могут применяться более дешевые баббиты (БН, БМ, Б-16 или Б-6 и БК).



**Цилиндры и поршни.** Рабочая поверхность цилиндров с течением времени истирается (вырабатывается). Значительная выработка приводит к увеличению зазора между поршнем и стенкой цилиндра. В результате выработки цилиндр получает овальную или бочкообразную форму. Допускаются следующие предельные величины выработки цилиндров и их втулок (в *мм*):

| Диаметр цилиндра | Бочкообразная выработка | Овальность | Диаметр цилиндра | Бочкообразная выработка | Овальность |
|---|---|---|---|---|---|
| 100—150 | 0,5 | 0,25 | 700—1000 | 1,6 | 0,8 |
| 150—300 | 1,0 | 0,4 | 1000—1200 | 1,75 | 1,0 |
| 300—400 | 1,3 | 0,5 | 1200—1500 | 2,0 | 1,2 |
| 400—700 | 1,4 | 0,6 | | | |

Если выработка превышает указанные пределы, то цилиндр растачивают или заменяют износившуюся цилиндровую втулку. Расточку цилиндра можно выполнять только на заводах, где имеется соответствующее оборудование — расточные и внутришлифовальные станки. В горизонтальных многоступенчатых компрессорах необходимо одновременно растачивать все цилиндры, чтобы величина расточки была одинаковой, в противном случае поршень горизонтального компрессора, лежащий на нижней части поверхности цилиндра I ступени, будет тереться о поверхность цилиндров остальных ступеней и вызовет их повышенный износ.

По этой же причине в горизонтальных компрессорах нельзя значительно растачивать цилиндры, так как связанное с этим опускание поршня и штока может оказаться настолько большим, что вызовет сильное трение штока в сальнике и быстрый износ этих частей. Если необходимо производить значительную расточку, то поршни заменяют новыми.

При сильном износе цилиндр можно расточить и запрессовать в него втулку из перлитного чугуна (если толщина стенки достаточна). Втулки запрессовывают в холодном состоянии, так как горячая запрессовка может вызвать недопустимые напряжения в стенках цилиндра и разрушение его. После запрессовки втулку растачивают до требуемого размера и шлифуют.

После каждой перешлифовки, а также во всех случаях, когда пропуск в цилиндрах обусловлен износом поршневых колец, последние заменяют. Для этого снимаемые кольца раздвигают отверткой и под них ставят две-три стальные полоски толщиной 1—1,5 *мм*, шириной 10 *мм* и длиной 300 *мм*; по полоскам кольцо легко снимается с поршня. Затем на поршень ставят новые кольца. При смене колец поршень необходимо осмотреть, зачистить имеющиеся заусенцы, забоины, прочистить и протереть канавки под кольцами.

Зазор в замке кольца должен быть не менее 0,005 диаметра цилиндра. Если этот зазор мал, его увеличивают опиловкой торцов кольца. Для проверки величины зазора кольцо вводят в цилиндр в плоскости его оси, а затем ставят в рабочее положение, поворачивая на 90°.

В канавку поршня кольцо должно входить плотно, без зазора, но не туго. По ширине кольца подгоняют опиловкой их личневым напильником, шлифовкой на плоскошлифовальном станке или притиркой на плите.

Толщина кольца должна быть меньше глубины канавки на 0,3—0,5 *см*. При установке колец на поршень их замки несколько смещают один относительно другого. Острые кромки колец слегка скругляют для облегчения попадания под них смазки. Иногда для придания кольцу большей упругости делают насечку на его внутренней стороне с помощью специальной накатки.

Кольца изготовляют из заготовки (маслоты), имеющей вид полого цилиндра, отлитого из мелкозернистого перлитного чугуна. Заготовку обтачивают снаружи по размеру диаметра цилиндра с припуском на шлифовку, а внутри — под окончательный размер. Затем ее разрезают на отдельные кольца, в них прорезают замки, все кольца надевают на оправку большего диаметра так, чтобы концы их разошлись, и подвергают закалке: нагревают до 875 °С, выдерживают при этой температуре в течение 30 *мин* и охлаждают в масле. После закалки собранные кольца отпускают, нагревая до 600 °С, а затем охлаждают вместе с оправкой на воздухе. Охлажденные кольца снимают с оправки и шлифуют их боковые поверхности. Затем кольца собирают в зажимном приспособлении на оправке, сжимая их до рабочего состояния. В таком виде кольца шлифуют снаружи до окончательного размера. Замки готовых колец, снятых с оправки, зачищают, а кромки колец скругляют.

Правильно изготовленное кольцо, будучи вставлено в цилиндр, должно плотно прилегать к его стенкам, без просвета между стенкой цилиндра и наружной поверхностью кольца. Если просвет имеется, то кольцо подлежит подгонке к цилиндру по краске или замене новым.

При установке поршня в цилиндр нужно соблюдать допускаемые размеры вредного пространства между крышкой цилиндра и поршнем. Крайние кольца поршней должны давать некоторый «перебег», т. е. выступать за край скошенной части зеркала цилиндра.

**Шатуны, штоки и сальники.** Шатуны, их головки и болты проверяют на отсутствие трещин. Для этого детали погружают в керосин, затем насухо протирают и покрывают меловой краской. После высыхания мела керосин в местах трещин выходит наружу, и трещину ясно видно. Детали с трещинами являются дефектными, и их заменяют новыми.

Штоки проверяют на овальность, конусность, наличие задиров и других дефектов. Для проверки овальности и конусности шток делят на участки и в каждом сечении проводят два замера по взаимно перпендикулярным осям. Овальность и конусность не должны выходить за пределы допусков, установленных на обработку по второму классу точности. Для штока диаметром 90 *мм* эти допуски составляют соответственно 0,03 и 0,02 *мм* на 100 *мм* длины. При износе штока в пределах до 0,2 *мм* его хромируют (гальванически). При значительном износе шток протачивают на станке, а затем шлифуют. Проточка допустима, если при этом поперечное сечение штока уменьшается не более чем на 5% первоначальной величины, предусмотренной в чертеже.



Если пропуск сальника не удается устранить подтягиванием грундбуксы, осматривают сальниковую набивку. Для этого сальник разбирают и, тщательно промыв его для очистки от масла, осматривают уплотнительные кольца. Если они имеют блестящие отшлифованные рабочие поверхности, это указывает на исправное состояние; темные матовые места, наволакивания, риски, задиры и другие дефекты свидетельствуют о необходимости пригонки кольца по штоку. Перед пригонкой колец шток выверяют, а выработку его, если она превышает допустимые пределы, устраняют шлифовкой.

Риски и царапины на штоке зачищают бархатным напильником и зашлифовывают мелкой шкуркой, смоченной маслом. После этого тщательно вытертую поверхность штока покрывают краской и, надев на него кольца, проводят их несколько раз вдоль штока. Места на внутренней поверхности кольца, покрытые краской, подвергают шабровке, которая считается законченной, когда не менее 70% всей рабочей поверхности кольца равномерно покрыто пятнами краски.

Зазор между штоком и кольцом должен быть в пределах 0,8—1,5 *мм*. Если зазор меньше 0,8 *мм*, это указывает на износ баббитовой заливки кольца. Такие кольца очищают от старого баббита и вновь заливают с припуском по диаметру 2—3 *мм* на сторону. После заливки кольца обтачивают до размера диаметра штока и пришабривают, как указано выше. В середине баббитовой заливки протачивают смазочную канавку шириной 3 *мм* и глубиной 2 *мм*.

Конические и торцовые поверхности колец и стаканов притирают, пользуясь мелкоизмельченным стеклом и машинным маслом.

Клингеритовая прокладка в сальнике между буксой и телом крышки цилиндра в случае повреждения заменяется новой, покрытой графитом, разведенным на масле.

При сборке сальника следует особо следить за чистотой его частей, не допускать появления заусенцев и проверять совпадение смазочных каналов колец и стаканов. Ослабевшие или разорвавшиеся стяжные и упорные пружины сальника заменяют новыми.

**Клапаны.** Ремонт клапанов заключается в смене поломанных пружин и пластин, а также в притирке пластин к седлу клапана. Герметичность клапанов (непременное условие нормальной работы компрессора) может быть нарушена попаданием под пластину какого-либо постороннего тела, например кусочка нагара. Пропуск устраняют, вскрыв и очистив клапан.

Под действием высокой температуры воздуха пластины могут коробиться, что также нарушает герметичность клапана. Неплотное прилегание пластины к седлу можно обнаружить, сняв клапан с

цилиндра компрессора или заполнив клапан водой или керосином. Негерметичность, вызванную выработкой поверхности пластины, устраняют шлифовкой пластины на станке и притиркой на плите. При этом можно повернуть пластину обратной стороной и притереть в таком виде. Покоробленную пластину осторожно выправляют на плите ударами медного молотка, а затем шлифуют и притирают.

Образовавшиеся на рабочей поверхности седла клапана вмятины, забоины, риски устраняют шлифовкой на станке с последующей притиркой рабочей поверхности.

В случае ослабления и поломки одной или нескольких пружин, что также может явиться причиной неплотности клапана, неисправные пружины заменяют новыми. Осевшую пружину, несколько растянув, временно можно оставить. Пружины с перекосом выправляют.

Притирку пластин производят на пасте ГОИ (сначала на крупной, а затем — на мелкой), поворачивая пластину попеременно вправо и влево. Притирка считается законченной, когда вся рабочая поверхность пластины приобретает равномерный матовый цвет. Притирка клапанов должна производиться особо тщательно.

Операцию притирки можно механизировать, проводя ее на чугунной притирочной плите, насаженной на вертикальный вал и вращаемой со скоростью 60—70 *об/мин* от электродвигателя через систему передач.

После притирки клапан собирают с пружинами и испытывают на плотность водой или керосином. Седла клапанов можно притирать на плите или с помощью специально изготовленных притирочных колец из чугуна.

Пружины клапанов изготовляют из круглой пружинной стальной проволоки путем навивки в холодном состоянии. Навивку можно производить на токарном станке, используя для этого оправку, диаметр которой должен быть немного меньше внутреннего диаметра пружины, так как после снятия с оправки пружина несколько распускается. Для навивки оправку ставят в центры токарного станка, конец проволоки помещают в отверстие, сделанное в оправке, и проволоку пропускают через две деревянные планки, зажатые в суппорте (этим создается требуемое для навивки пружины натяжение).

Готовую пружину разрубают на куски необходимой длины и концы правят на наждачном круге. Пружину после навивки подвергают термической обработке (если таковая предусмотрена для проволоки данной марки), а затем выдерживают в полностью сжатом состоянии в течение 24 *ч* при 250 °С. Готовую пружину проверяют на осадку и на перпендикулярность оси пружины ее опорной поверхности.

Клапан собирают и разбирают, пользуясь специальными торцовыми ключами, во избежание порчи граней гайки затяжного болта. Нажатие клапана стопорными болтами производят равномерно.



попеременно подтягивая болты, расположенные на диаметрально противоположных сторонах окружности.

Очистку клапанных коробок и цилиндров от нагара производят промывкой в растворе, применяемом для удаления нагара из труб холодильников (см. ниже). После промывки клапаны и цилиндры протирают салфетками.

**Холодильники.** Ремонт холодильников, кроме очистки их от накипи и нагара, заключается в устранении возникшей негерметичности, вызывающей потери сжатого воздуха и понижающей тем самым производительность кислородной установки. Пропуск воды представляет определенную опасность, так как при ее попадании в воздухопроводы, а затем в цилиндры компрессора возможны гидравлические удары в них и авария компрессора.

Негерметичность появляется в результате коррозии трубок холодильника, перетирания стенок труб от вибрации в местах расположения перегородок или нарушения соединения трубки с решеткой в месте развальцовки. К этому могут привести резкие колебания температуры, возникающие в холодильнике, например, при пуске холодной воды в нагретый холодильник. Для предотвращения таких явлений необходимо сначала наполнить холодильники водой, а затем пускать компрессор.

Дефекты от коррозии, а также трещины в решетках устраняют очисткой от ржавчины и последующей заваркой или заменой поврежденного холодильника новым. Пропуск в развальцовке устраняют дополнительной вальцовкой дефектного места. При установке новой трубы отверстие под нее очищают от накипи, нагара и прочих загрязнений и калибруют разверткой для придания отверстию формы правильной окружности.

При появлении трещины в трубке змеевикового холодильника лучше удалить лопнувшую часть трубки и вварить вместо нее новый кусок. Медные трубки ремонтируют пайкой твердым медно-цинковым припоем. Дефектные трубки можно заглушить, если при этом общая поверхность холодильника уменьшается не более чем на 15%.

Водяные полости холодильников промывают раствором, содержащим 1 ч. технической соляной кислоты (ТУ 35-ХП-567—63) и 3 ч. воды. После этого холодильник промывают в течение 15—20 *мин* слабым раствором соды или водой для удаления остатков кислоты. Холодильники без труб и деталей из цветных и легких металлов можно промывать раствором, состоящим из каустической соды (750 *г*), керосина (150 *г*) и воды (10 *л*). Холодильники с деталями из цветных металлов промывают в течение 10 *мин* раствором, содержащим в 1 *л* воды 1—2 *г* кальцинированной соды и 2—5 *г* хромпика, с последующим заполнением всей системы чистой водой, в которую добавляют 2—3 *г/л* хромпика. Промывку этим раствором ведут до полного удаления накипи. Затем систему промывают чистой водой и просушивают воздухом или азотом. Значительные отложения накипи удаляют до промывки скребками.

Трубки холодильников очищают от масла промывкой мыльным (1 ч. жидкого мыла на 12 ч. воды) или моющим раствором или обезжиривают растворителем с последующей тщательной продувкой до полного удаления запаха растворителя. Трубки холодильников очищают от нагара скребками или ершами с после-

дующей промывкой раствором следующего состава (*г* на 10 *дм*³ воды): зеленого мыла — 100, соды — 100, жидкого стекла — 100, хромпика — 10. При промывке температура раствора должна поддерживаться равной 80—100 °С.

**Обкатка компрессора.** После ремонта компрессор необходимо обкатать без нагрузки для приработки сопряженных поверхностей движущихся деталей. Перед обкаткой из клапанных гнезд компрессора вынимают все клапаны. Затем вал компрессора проворачивают вручную несколько раз для того, чтобы убедиться в свободном ходе всех движущихся частей; проверяют поступление масла ко всем смазываемым частям компрессора, для чего масляный насос высокого давления вручную прокачивают до появления масла в контрольных отверстиях, расположенных перед обратными клапанами маслопровода. Проверяют также подачу масла шестеренчатым насосом, пользуясь для этого рукояткой на насосе.

Затем пускают охлаждающую воду в холодильники и рубашки цилиндров компрессора и проверяют достаточность поступления воды. После этого включают электродвигатель компрессора. Когда вал компрессора начнет вращаться с нормальной скоростью, двигатель выключают и после остановки компрессор осматривают.

Если при первом пуске компрессор работал спокойно, без стука, вибрации и смазка нормально поступала ко всем трущимся частям, машину вновь пускают в ход на 3—5 *мин*, после чего останавливают и проверяют, не нагреваются ли трущиеся части (подшипники, ползун, сальник и др.). Одновременно проверяют затяжку всех гаек, целостность шплинтов и других крепежных деталей. После устранения выявленных неисправностей компрессор пускают в работу на 15—20 *мин*, а затем останавливают для третьего осмотра.

После этого тщательно продувают все трубопроводы, холодильники и цилиндры компрессора для удаления частиц окалины и других загрязнений. Продувку производят несколькими пусками компрессора. При этом в продуваемой ступени и предыдущих ступенях должны быть установлены клапаны и собрана коммуникация, а в следующих за продуваемой ступенях — клапаны вынуты и крышки клапанов сняты. В процессе продувки необходимо обстукивать воздухопроводы, холодильники и маслоотделители. Продуваемый участок трубопроводов должен быть отключен от последующих ступеней компрессора.

По окончании продувки компрессор останавливают, клапаны разбирают и промывают. Промывают также и каналы цилиндров для удаления грязи, осевшей на них при продувке. Затем клапаны собирают, проверяют на герметичность керосином и пускают компрессор работать вхолостую в течение 30—60 *мин*. При этом продувочные вентили на последней ступени компрессора должны быть открыты полностью, а на остальных ступенях частично, с тем чтобы после каждой ступени избыточное давление не превышало 0,5—1 *кгс/см*². Если компрессор работает нормально, то после остановки и осмотра его можно вновь пустить на холостой ход для непрерывной работы в течение 6 *ч*.



После первых трех пусков нужно разобрать и промыть керосином сетки масляных фильтров (при обкатке компрессора они сильно загрязняются вследствие того, что на них оседает вся пыль, уносимая маслом). Масло после шестичасовой обкатки компрессора заменяют свежим или фильтруют через мелкую сетку и фланель.

Устранив неполадки, выявленные при обкатке компрессора, его пускают для работы под нагрузкой в течение 6 *ч*. Для повышения нагрузки компрессора постепенно закрывают продувочные вентили, начиная с I ступени. При этом проверяют герметичность коммуникаций и устраняют замеченные неисправности. В этот период регулируют предохранительные клапаны, которые должны открываться при давлении, превышающем на 10% рабочее давление данной ступени.

Если при пробном пуске под нагрузкой компрессор в течение 6 *ч* работает спокойно, без стука и перегрева подшипников, он может быть пущен в эксплуатацию.

На период обкатки и последующей приработки поршней, цилиндров и колец после монтажа и капитального ремонта нормы подачи смазки на 10—15 дней работы могут быть увеличены вдвое против рекомендованных заводом-изготовителем. После окончания приработки подачу масла уменьшают до нормальной.

## 5.4. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ (ТУРБОКОМПРЕССОРЫ)

Сжатие больших количеств воздуха (более 8000 *м*³/*ч*) целесообразно производить не в поршневых, а в центробежных компрессорах (турбокомпрессорах). В турбокомпрессоре сжатие воздуха осуществляется в каналах, образуемых лопатками рабочих колес. Воздух сжимается под действием центробежных сил, возникающих при быстром вращении рабочего колеса.

Турбокомпрессоры надежны в работе, обеспечивают непрерывную и равномерную подачу воздуха и просты в обслуживании; воздух не загрязняется парами масла. Турбокомпрессор приводится во вращение электродвигателем или паровой турбиной. Он занимает значительно меньше места, чем поршневые компрессоры соответствующей производительности.

Как правило, турбокомпрессоры выпускаются на невысокие давления сжатия — примерно $p_и = 6—8$ *кгс/см*²; однако в некоторых случаях применяются турбокомпрессоры и на давление до 35 *кгс/см*².

При давлении сжатия свыше 15 *кгс/см*² степень безопасности эксплуатации центробежных компрессоров ниже, чем поршневых. Поэтому иногда для сжатия воздуха до 8 *кгс/см*² применяют центробежные компрессоры, а последующее дожатие до более высоких давлений производят поршневыми машинами (рис. 5.21).

Ротор турбокомпрессора состоит из ряда рабочих колес с радиальными лопатками. Колеса насажены на общий вал. На рис. 5.22 показано рабочее колесо с лопатками *1* и частью корпуса компрессора. Колесо вращается по стрелке около неподвижного направляющего аппарата (диффузора), снабженного лопатками *2*. Каналы *3* соединяют направляющий аппарат с рабочим колесом следующей ступени сжатия.

При вращении рабочего колеса воздух засасывается в центральную его часть и движется от центра к периферии. При этом скорость воздуха под действием центробежных сил увеличивается и достигает наибольшего значения на окружности колеса

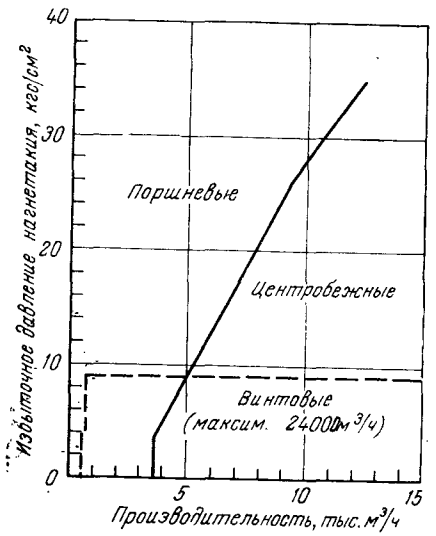



Рис. 5.21. Области применения компрессионных машин различных типов

С этой скоростью поток воздуха входит в расширяющиеся каналы между лопатками направляющего аппарата. Здесь скорость падает, а давление повышается. Сжатый в первом колесе воздух перехо

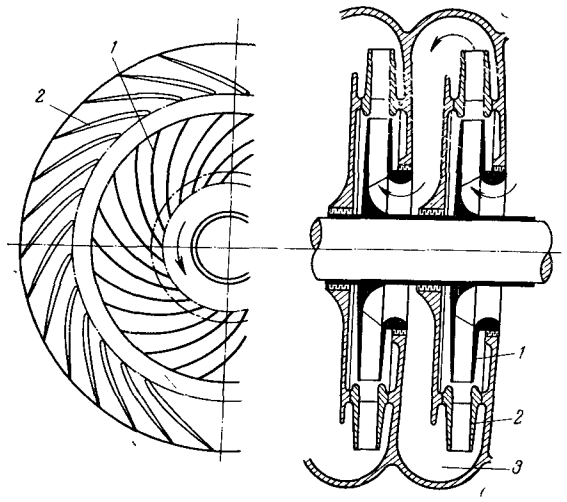



Рис. 5.22. Рабочее колесо турбокомпрессора: *1* — рабочее колесо; *2* — лопатки направляющего аппарата (диффузора); *3* — соединительные каналы.



дит по соединительному каналу в следующее рабочее колесо, где сжимается до более высокого давления. Таким образом, воздух последовательно проходит все рабочие колеса, и в каждом из них давление повышается на некоторую величину.

Колеса изготовляют из легированной высокопрочной стали. К заднему диску колеса на шипах приклепаны лопатки из стали или дюралюминия соответствующего профиля (рис. 5.23).

Сверху на лопатки устанавливается второй, так называемый покрывной диск (на рисунке не показан), в котором расклепывают верхние шипы лопаток.

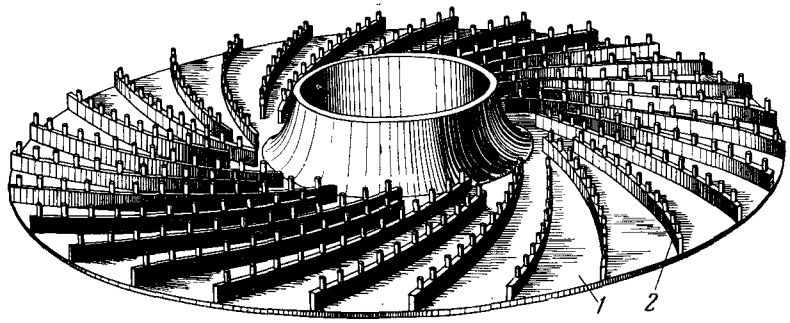



Рис. 5.23. Рабочее колесо ротора турбокомпрессора (покрывной диск снят): *1* — основной диск; *2* — лопатки.

Некоторые турбокомпрессоры (ЦК-100-51; КТК-7; КТК-12,5) имеют вместо направляющих аппаратов с лопатками спиралеобразные отводы, посредством которых поток воздуха плавно проходит из одного колеса в другое. Такая конструкция используется в турбокомпрессорах, роторы которых работают с большим числом оборотов и высокой окружной скоростью на ободе колеса.

Турбокомпрессорный агрегат (рис. 5.24) монтируется на железобетонном фундаменте. Под корпусом турбокомпрессора *3*, ниже уровня пола или сбоку, устанавливаются промежуточные холодильники *4*, в которых воздух, пройдя несколько ступеней сжатия (рабочих колес), охлаждается. Воздух засасывается через воздушный фильтр *1* и трубу *2*. Турбокомпрессор приводится в движение от электродвигателя *7* через шестеренчатый редуктор *6*. Если привод от паровой турбины, редуктор не ставится.

Общая схема турбокомпрессорного агрегата и основных коммуникаций приведена на рис. 5.25.

В турбокомпрессорном агрегате смазка специальными турбинными маслами требуется для подшипников и шестерен редуктора. Смазка подается ко всем точкам шестеренчатым масляным насосом под избыточным давлением 0,8—1 *кгс/см²*. На время пуска турбокомпрессора смазка подается отдельным (пусковым) масляным насосом с приводом от небольшого электродвигателя.

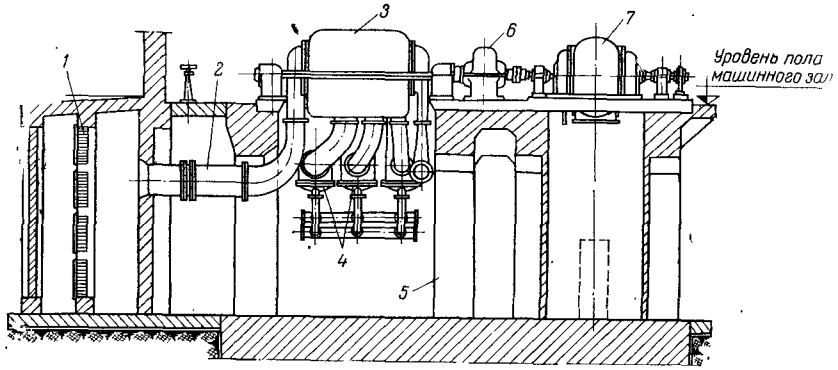



Рис. 5.24. Установка турбокомпрессорного агрегата:
*1* — воздушный фильтр; *2* — всасывающая труба; *3* — турбокомпрессор; *4* — промежуточные холодильники; *5* — фундамент; *6* — редуктор; *7* — электродвигатель.

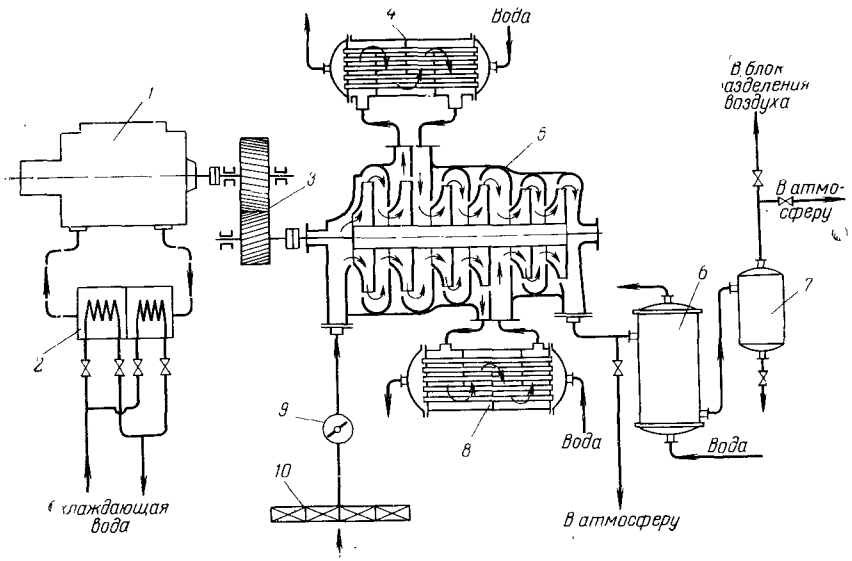



Рис. 5.25. Схема турбокомпрессорного агрегата:
*1* — электродвигатель; *2* — холодильник воздушной системы охлаждения электродвигателя; *3* — редуктор; *4* — охладитель воздуха после первой группы колес; *5* — турбокомпрессор; *6* — концевой холодильник; *7* — водоотделитель; *8* — охладитель воздуха после второй группы колес; *9* — задвижка; *10* — воздушный фильтр.

Во время работы турбокомпрессора требуется непрерывная подача масла под постоянным давлением (указанным в инструкции). Если по каким-либо причинам подача смазки к подшипникам прекратится хотя бы на короткое время, может расплавиться баббит вкладышей подшипников. Поэтому турбокомпрессоры снабжены автоматическими устройствами, включающими электродвигатель резервного маслонасоса в том случае, если избыточное давление масла в системе снизится до 0,3 *кгс/см*$^2$.

Шестеренчатый масляный насос забирает из масляного бака масло и через распределитель и холодильник подает в подшипники. Нагревшееся в подшипниках масло поступает в маслосборники. Нагревшееся в подшипниках масло поступает в маслосборники и самотеком сливается в масляный бак. Емкость маслосистемы турбокомпрессора должна быть достаточно большой, чтобы циркуляция масла обеспечивала отвод всего количества тепла от подшипников. Чем больше емкость бака, тем лучше отстаивается в нем масло. Температура масла после холодильника должна быть не ниже 20 °С и не выше 40—45 °С.

В подшипниках масло не должно нагреваться выше 55—60 °С, так как при более высокой температуре оно начинает частично окисляться и становится непригодным для смазки. Особенно вредно попадание в масло воды, поэтому в масляном холодильнике не должно быть ни малейших пропусков воды; при обнаружении таких пропусков необходимо немедленно принять меры к их устранению. Если в масло попала вода или в маслосистеме обнаружены отложения грязи и смолистых веществ, необходимо все масло слить, маслосистему очистить и заполнить ее чистым маслом.

Для смазки подшипников турбокомпрессоров применяют турбинные масла марок: 22 — турбинное Л, 30 — турбинное УТ (ГОСТ 32—53). Турбинное масло Л применяется для смазки шеек роторов турбокомпрессоров с непосредственным приводом от электродвигателя или паровой турбины, а турбинное масло УТ — для смазки шестерен редуктора и шеек роторов турбокомпрессоров и турбодетандеров при общей централизованной смазке. Характеристика турбинных масел приведена в табл. 5.2.

Производительность турбокомпрессора $Q$, конечное давление $p$, мощность на валу $N_в$ и изотермический к. п. д. ($\eta$) связаны зависимостью, которая выражается графически внешней характеристикой турбокомпрессора (рис. 5.26). Значения этих величин определяются при постоянном числе оборотов машины; если число оборотов изменилось, положение соответствующих кривых на диаграмме также изменяется. Как видно из рис. 5.26, наибольшая производительность $Q_{max}$ достигается при отсутствии давления на нагнетательном патрубке ($p=0$), т. е. при работе на выхлоп в атмосферу.

Если начать прикрывать задвижку на линии нагнетания, производительность уменьшается, а давление возрастает, достигая максимальной величины в точке $K$, соответствующей производи-

тельности $Q_к$. Точка $K$ называется *критической*, так как при дальнейшем уменьшении производительности работа турбокомпрессора становится неустойчивой и машина может войти в «помпаж», т. е. производительность турбокомпрессора периодически падает до нуля, газ начинает проходить через компрессор в обратном направлении и машина испытывает резкие сотрясения. При полностью закрытой напорной задвижке давление становится ниже критического. Кратковременная работа турбокомпрессора при закрытой напорной задвижке допускается, так как это не представляет опасности для машины.

Длительная работа в указанных условиях нежелательна, так как компрессор чрезмерно нагревается. Расчетная, или нормальная производительность $Q_н$ лежит на кривой $Q-p$, где-то в точке $A$ и отвечает максимальному значению к. п. д.

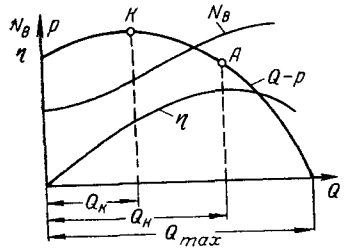



Рис. 5.26. Внешняя характеристика турбокомпрессора:

$Q-p$ — кривая зависимости между производительностью и давлением; $N_в$ — кривая мощности на валу; $\eta$ — кривая изотермического к. п. д.

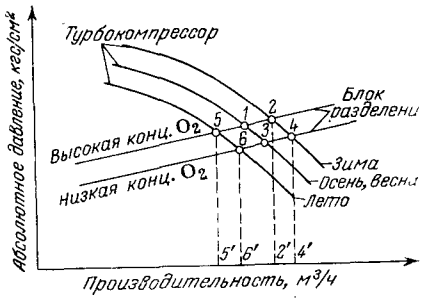



Рис. 5.27. Зависимость между характеристиками турбокомпрессора и блока разделения воздуха для различных периодов года.

Мощность на валу турбокомпрессора с увеличением производительности возрастает до некоторого предела, после чего начинает снижаться.

Внешняя характеристика турбокомпрессора, подающего воздух в установку низкого давления, связана с характеристикой работы блока разделения (рис. 5.27). Прямые на графике показывают зависимость производительности блока от давления воздуха после турбокомпрессора (перед блоком) для кислорода высокой и низкой концентрации; с повышением концентрации кислорода давление воздуха после турбокомпрессора повышается.

Внешние характеристики турбокомпрессора (кривые $Q-p$) располагаются на графике в зависимости от наружной температуры воздуха: для лета — ниже, для зимы — выше. Летом масса засасываемого турбокомпрессором воздуха уменьшается и производительность по кислороду снижается (точки $2'$ и $5'$ для высокой концентрации кислорода, точки $4'$ и $6'$ для низкой).



Производительность турбокомпрессоров с электроприводом, имеющим постоянное число оборотов, обычно выбирается такой, чтобы обеспечить требуемую производительность блока по кислороду в летних условиях. Поэтому зимой эти турбокомпрессоры дают больше воздуха, чем может переработать блок разделения, и их производительность приходится уменьшать дросселированием на всасывании. Этим снижается к. п. д. турбокомпрессора и увеличивается удельный расход энергии на получение кислорода. Поэтому турбокомпрессоры с паровой турбиной, которая допускает в известных пределах изменение числа оборотов турбокомпрессора в соответствии с требуемой производительностью по воздуху, более экономичны по расходу энергии в условиях переменных температур засасываемого воздуха.

Производительность компрессора должна обеспечивать потребность в воздухе одного блока разделения во все периоды года. Использование одного компрессора для снабжения воздухом двух и более блоков приводит к перерасходу энергии, хотя и дает некоторое снижение капиталовложений. В настоящее время разработаны воздушные центробежные компрессоры, производительность которых можно регулировать весьма экономичным способом — изменением угла поворота лопаток направляющего аппарата. Такие компрессоры работают во все времена года на оптимальном режиме, что снижает расход энергии на получение кислорода в среднем на 10—15% в год по сравнению с компрессорами, регулирование производительности которых производится дросселированием воздуха на всасывании и снабженными электроприводом.

Центробежные компрессоры применяют также для сжатия кислорода.

ВНИИкриогенмаш разработаны и переданы в промышленность кислородные турбокомпрессоры на конечные давления $p_а$ = до 35 *кгс/см²* для сжатия больших количеств кислорода, применяемого в мартеновских и конверторных цехах.

Одна из таких машин — турбокомпрессор КТК-7 показан на рис. 5.28. Этот компрессор имеет восемь ступеней сжатия, размещенных в двух корпусах, соединенных последовательно. Вместо направляющего аппарата компрессор снабжен двухдиффузорными спиральными отводами сжимаемого газа после каждой ступени, кроме последней, которая имеет однодиффузорный отвод. После каждых двух ступеней сжатия кислород направляется в выносные трубчатые холодильники, расположенные по обе стороны от компрессора. Всего имеется три пары холодильников. Вода в холодильнике проходит внутри оребренных труб овального сечения; снаружи труб, между их ребрами, проходит охлаждаемый сжатый кислород.

Ротор турбокомпрессора приводится во вращение от синхронного электродвигателя через редуктор, повышающий число оборотов. Смазка всех подшипников и зубчатого зацепления шестерен

Таблица 5.6. **Основные технические данны**

| Тип турбокомпрессора | Производительность при 20 °С и $p_a$ = 0,97 *кгс/см²*, *м³/ч* | Давление сжатия абсолютное, *кгс/см²* | Число оборотов в 1 *мин* | Потребляемая мощность, *квт* | Привод: вид | Привод: мощность, *квт* | Привод: число оборотов | Вес, *т*: турбокомпрессора | Вес, *т*: редуктора | Вес, *т*: привода | Расход воды****, *м³/ч* | Применяется для установок |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| К-3000-61-1 | I режим 19 2000 | 6,6 | 3 250 | 14 200 | Паровая турби | 18 000 | 3 250 | 120 | — | 74 | 1 000/800 | КтК-35-2; КАр-30 |
| | II режим— 210 000 | 7,1 | 3 400 | 17 000 | АКВ-18-III | 19 000 | 3 400 | — | — | — | 1 000/800 | |
| | | | | | ВКВ-22-I | 20 500 | 3 400 | 120 | — | 83 | 1 000/800 | |
| К-1600-41-1 | 96 000 | 7,5 | 4 900 | 7 700 | Электродвигат | 9 000 | 3 000 | — | — | — | 500/315 | АКт-17-1 |
| К-1500-62-5 | 90 600 | 7,7 | 4 550 | 7 340 | Паровая турби К-9-35-1 | 9 000 | 3 500—4 550 | 55 | — | — | 500/315 | АКт-17-1 |
| К-1500-62-2 | 95 400 | 8,0 | 4 470 | 7 700 | Электродвигат | 9 000 | 3 000 | 55 | 6,3 | 35 | 892/315 | Кт-12-2; КтА-12-2; КтК-12-1; К-11-1; КА-13,5 |
| К-1500-62-1 | 77 400 | 8,7 | 4 370 | 6 600 | » | 9 000 | 3 000 | 55 | 6,3 | 35 | 892/315 | Те же установки |
| К-905-61-1 | 52 800 | 7,5 | 4 700 | 5 700 | » | 6 000 | 3 000 | 44,3 | 4,2 | 33,4 | 740/215 | АКт-16-2; АКт-16-1 |
| К-500-61-1 | 31 500* | 9,0 | 7 636 | 3 000 | » | 3 500 | 3 000 | 22 | 2,6 | 18,5 | 550/160 | Кт-5-1; КА-1 |
| К-500-61-2 | 30 600 | 7,5 | 7 455 | 2 650 | » | 3 500 | 3 000 | 22 | 2,6 | 18,5 | 550/160 | КА-1; Кт-5-1 |
| К-350-62-1 | 21 000 | 7,5 | 8 615 | 1 850 | » | 2 500 | 3 000 | 14,5 | 2,36 | 10,6 | 330/80 | Кт-3600-Ар; А-8 и др. |
| ЦК-100-61 | 6 000* | 6,5 | 15 200 | 585 | » | 630 | 2 970 | 9,1 | 1,25 | 4,4 | 120/30 | Кт-1000М |
| ЦК-135/8 | 8 160* | 7,8 | 13 645 | 880 | » | 1 000 | 2 980 | 14,3 | 2,66 | 7,16 | 130/30 | Бр-14 |
| КТК-7** | 7 020*** | 15 | 13 645 | 1 500 | » | 1 500 | 3 000 | 3,2 | 2,7 | 10,5 | 140/30 | Кт-12-2 и др. |
| КТК-12,5/35** | 14 160*** | 35 | 13 800 | 2 700 | » | 3 500 | 3 000 | 18,5 | 3,5 | 18,3 | 420/740 | КтК-35-2; КтК-12-1 и др. |

* При 20 °С и 760 *мм рт. ст.*
** Кислородные.
*** При 20 °С и абсолютном давлении 1,03 *кгс/см²*.
**** Расход воды указан только для турбокомпрессора, числитель—для промежуточных, зн



**воздушных и кислородных турбокомпрессоров**

**натель—для концевых охладителей.**

редуктора—циркуляционная, принудительная от масляного насоса масло охлаждается водой в масляном холодильнике.

Пуск и остановка турбокомпрессора производятся нажатием кнопок. Агрегат снабжен автоматическими устройствами для поддержания постоянного давления сжатия путем дросселирования сжатого газа на линии всасывания, устройствами, предупреждающими возникновение явления «помпажа» путем перепуска избытка кислорода во всасывающую линию, а также защитными устройствами, автоматически останавливающими компрессор при недостаточной подаче смазки или охлаждающей воды.

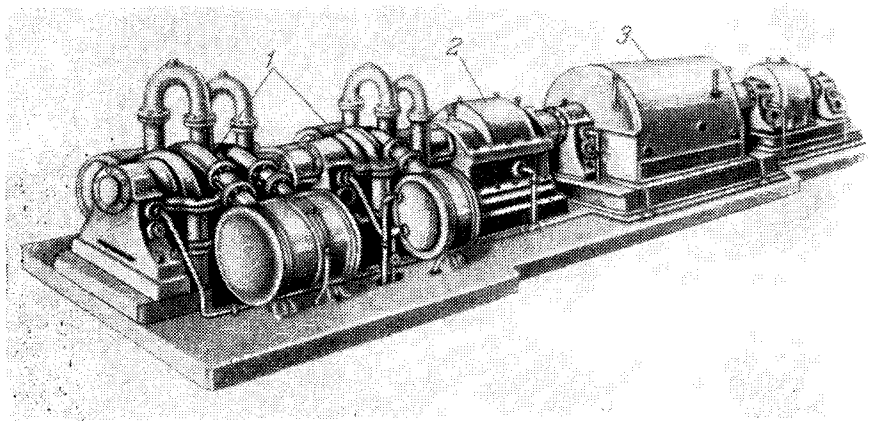



Рис. 5.28. Кислородный турбокомпрессор КТК-7 конструкции ВНИИкриогенмаша:
*1* — турбокомпрессор; *2* — редуктор; *3* — электродвигатель.

Турбокомпрессор КТК-7 рассчитан на безопасную работу его частей в среде сжатого газообразного кислорода высокой концентрации.

Технические данные воздушных и кислородных турбокомпрессоров для комплектации воздухоразделительных установок приведены в табл. 5.6.

Кислородные центробежные турбокомпрессоры имеют следующие параметры (типовой ряд):

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Производительность, $м^3/ч$ . . . | 3 500—4 000 | 7 000—8 000 | 13 000—14 000 | 19 000—21 000 |
| Конечное абсолютное давление, $кгс/см^2$ . . . . | 12 | 15 и 30 | 15, 30 и 35 | 8 |

При пуске кислородного турбокомпрессора сначала заполняют компрессор и его лабиринты азотом, затем пускают охлаждающую воду и включают пусковой масляный насос. Электродвигатель



компрессора включают после того, как расход воды и давление масла достигнут предусмотренных инструкцией величин. Когда вал компрессора достигнет нормального числа оборотов, турбокомпрессор постепенно нагружают, повышая давление азота. Когда установится нормальный тепловой режим работы турбокомпрессора, в него начинают подавать кислород, одновременно прикрывая задвижку на линии азота. Кислородно-азотная смесь выбрасывается в атмосферу. Далее с помощью дроссельной и обводной задвижки на всасывании устанавливают давление, равное давлению в сети, после чего открывают вентиль на линии нагнетания и начинают подачу в сеть сжатого кислорода.

Турбокомпрессорный агрегат оснащен системой автоматического пуска и регулирования, а также предохранительными устройствами (датчиками), которые останавливают турбокомпрессор при повышении температуры его частей, прекращают поступление кислорода в компрессор и включают механизмы, осуществляющие заполнение его полостей азотом.

### 5.4.1. Обслуживание турбокомпрессоров

Обслуживание турбокомпрессоров заключается в наблюдении за температурой, давлением масла и воды, а также за работой подшипников. Наиболее ответственными моментами обслуживания турбокомпрессорного агрегата являются подготовка к пуску и пуск.

**Подготовка к пуску.** Перед пуском турбокомпрессора проверяют уровень масла в баке и соответствие сорта масла установленному инструкцией. Затем приводят в действие пусковой масляный насос, работающий от отдельного электродвигателя. Проверяют герметичность соединений маслопроводов; достаточность поступления масла к подшипникам и слива масла из них; давление масла после насоса, до и после масляного холодильника, перед редуктором и подшипниками; правильность работы масляного реле, которое должно срабатывать при наименьшем избыточном давлении масла 0,3 $кгс/см^2$.

Температура масла после масляного холодильника не должна быть ниже 20 °С. В зимнее время, при низкой температуре окружающего воздуха, рекомендуется предварительно подогревать масло паром или горячей водой.

Если турбокомпрессор пускают в ход после монтажа впервые, пусковой насос должен прокачивать масло в течение 2—3 *ч*. В этом случае на всех точках ввода масла в подшипники нужно поставить временные фильтры из двух-трех слоев марли. После прокачки масла снимают крышки подшипников, масляный фильтр, сервомотор регулировки автоматического клапана, регуляторы и главный масляный насос и тщательно очищают их от грязи и отложений. В случае необходимости при этом производят также очистку масляного бака, масляного холодильника и всех маслопроводов, спу-

стив из системы масло. Слишком загрязненное масло фильтруют или центрифугируют.

После того как вся маслосистема тщательно очищена и ее исправность проверена в действии, проверяют систему водяного охлаждения, для чего пускают охлаждающую воду в холодильники турбокомпрессора и масляные холодильники, проверяют герметичность всех соединений, а также работу контрольных приборов.

При пуске охлаждающей воды спускают воздух из верхней части водяного пространства холодильников через продувочные краны, которые должны быть всегда открытыми. Из них вытекает небольшая струйка воды, отрегулированная таким образом, чтобы избыточное давление воды в холодильниках не превышало 1,5 *кгс/см*². Испытывают водяное реле, которое должно срабатывать при уменьшении расхода воды на 30% против нормального, проверяют правильность установки всех рукояток маслорегулирующих вентилей и действие заслонки на всасывающей трубе турбокомпрессора.

Перед пуском турбокомпрессора следует убедиться в том, что заслонки на всасывающей и нагнетательной трубах закрыты, а вентиль на трубе сброса воздуха в атмосферу (байпас) полностью открыт.

Для первого пуска турбокомпрессора сначала дают «толчок», т. е. включают электродвигатель, а когда скорость вращения вала турбокомпрессора станет примерно равной половине его нормального числа оборотов, электродвигатель выключают. При этом вновь проверяют подачу масла к подшипникам, не задевает ли ротор о неподвижные части, прослушивают, нет ли стуков, вибраций в подшипниках и редукторе, а также измеряют температуру охлаждающей воды на входе и выходе.

**Пуск турбокомпрессора и обслуживание его во время работы.** Если при пробном пуске никаких ненормальностей в работе турбокомпрессора не обнаружено, можно приступить к пуску его под нагрузкой. Для этого:

1) подготавливают турбокомпрессор к пуску, как указано выше;

2) закрывают полностью задвижку на всасывающей трубе;

3) проверяют подачу воды в холодильники турбокомпрессора и регулируют краны спуска воздуха из водяных камер холодильников;

4) приводят в действие пусковой масляный насос, проверяют давление и температуру масла и поступление его к подшипникам;

5) открывают полностью байпас для выпуска воздуха в атмосферу и закрывают задвижку на нагнетательной трубе;

6) включают электродвигатель.

После достижения нормального числа оборотов проверяют достаточность подачи масла шестеренчатым масляным насосом ко всем подшипникам и начинают постепенно нагружать турбокомпрессор, для чего медленно открывают задвижку на всасывающей трубе. Когда давление после турбокомпрессора достигнет установ-



Таблица 5. 7. **Основные возможные неполадки в работе турбокомпрессора и способы их устранения**

| Неполадки | Причина | Способы устранения |
|---|---|---|
| Легкая вибрация вала, ощущаемая в виде легкого дрожания («зуда») подшипников и даже некоторых частей корпуса | а) Увеличение зазоров между шейками вала и вкладышами подшипников вследствие износа, вызванного загрязнением масла | а) Перешабрить вкладыши и сменить масло, промыв и очистив всю масляную систему |
| | б) Нарушение центровки муфтовых соединений | б) Проверить центровку и устранить неточность сборки |
| | в) Отложение грязи в лабиринтных уплотнениях ротора | в) Вскрыть корпус, очистить лабиринтные уплотнения, заменить поврежденные уплотнения новыми |
| Уменьшение производительности турбокомпрессора и понижение температуры сжатого воздуха | а) Недостаточная подача воды | а) Выяснить и устранить причину недостаточной подачи воды |
| | б) Накопление грязи или накипи в холодильниках | б) Очистить холодильник от накипи и грязи |
| Перегрев подшипников | а) Недостаточная подача смазки (на что указывает понижение давления в масляной системе) или загрязнение масляного фильтра, что сопровождается повышением давления масла перед ним | а) Очистить масляный фильтр |
| | б) Плохое охлаждение масла вследствие недостаточной подачи воды в масляный холодильник | б) Выяснить и устранить причину недостаточной подачи воды |
| | в) Попадание в подшипники грязи, вызвавшей износ вкладыша и шейки | в) Вскрыть и осмотреть подшипник; очистить подшипник и всю масляную линию от грязи |
| Пропуск воздуха в холодильниках | Нарушение герметичности в местах развальцовки труб и перетирание труб от вибрации | Ремонт холодильника с заменой дефектных труб |

ленной регламентом величины, начинают открывать задвижку на напорной трубе, одновременно прикрывая задвижку на байпасе. Так поступают до тех пор, пока задвижка на нагнетательной трубе не будет полностью открыта, а байпас полностью закрыт. Одновременно с этим заканчивают открывание задвижки на всасывающей трубе, нагружая турбокомпрессор до максимальной производительности. После этого, убедившись в нормальной работе главного масляного насоса, пусковой масляный насос отключают. Когда температура масла повысится до 40—45 °С, включают подачу охлаждающей воды в масляный холодильник.

Обслуживание турбокомпрессора во время работы заключается в постоянном наблюдении за давлением и температурой воздуха, масла и воды, а также за температурой масла и поступлением его в подшипники и воды в холодильники. Систематически контролируют температуру подшипников, а также следят, чтобы в компрессоре не возникали шум, стуки и вибрации. Дежурный машинист через каждый час заносит в журнал данные наблюдений. В журнале должны быть графы для записи температуры всасываемого воздуха; конечного давления воздуха и температуры сжатия воздуха; температуры охлаждающей воды до и после холодильников; давления масла после масляного электронасоса, в главном шестеренчатом масляном насосе, до и после маслоохладителя; мощности, потребляемой турбокомпрессором; напряжения в сети, а также показаний других приборов. При наличии регистрирующих контрольно-измерительных приборов показания этих приборов в журнале не записываются, а диаграммы приборов хранятся в цехе вместе с рабочими журналами о работе компрессора.

Для остановки турбокомпрессора выключают электродвигатель, закрывают всасывающую задвижку и открывают байпас. При длительной остановке спускают воду из холодильников турбокомпрессора и маслоохладителя, затем останавливают вспомогательный масляный насос.

Основные неполадки, возможные в работе турбокомпрессора, и способы их устранения указаны в табл. 5.7.

Если во время работы турбокомпрессора произойдет слишком сильный нагрев какого-либо из подшипников, машину следует немедленно остановить и подшипник вскрыть для выяснения и устранения причины нагрева. Вскрытие подшипников и их проверка должны производиться только опытными работниками, которые знакомы с этим видом работ.

Правильно смонтированный и отрегулированный турбокомпрессор при надлежащем наблюдении за смазкой и охлаждением может работать длительное время без ремонта.

ГЛАВА 6

# МАШИНЫ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ВОЗДУХА (ДЕТАНДЕРЫ)

Детандером называется *машина для расширения воздуха с отдачей внешней работы.* По конструкции детандеры подразделяются на поршневые и турбодетандеры, применяемые в зависимости от давления, расхода и степени расширения воздуха.

Степенью расширения называется *отношение начального абсолютного давления* $p_н$ *к конечному абсолютному давлению* $p_к$ *газа, проходящего через детандер.* Поршневые детандеры применяются при степени расширения от 5 до 200 и расходе воздуха от 50 до 3000 *м³/ч*; турбодетандеры — при степени расширения менее 30 и расходе свыше 3000 *м³/ч*.

Для получения холода в детандере в качестве рабочего газа используется сжатый воздух или азот.

## 6.1. ПОРШНЕВЫЕ ДЕТАНДЕРЫ

### 6.1.1. Классификация поршневых детандеров

В зависимости от рабочего давления и температуры поступающего воздуха поршневые детандеры можно разделить на три группы:

Высокого давления, работающие при избыточном давлении впуска 160—200 *кгс/см²*, температуре впуска от +20 до —50 °С и температуре выпуска от —130 до —170 °С.

Среднего давления, работающие при избыточном давлении впуска 15—70 *кгс/см²*, температуре впуска от —60 до —110 °С и температуре выпуска до —170 °С.

Низкого давления, работающие при избыточном давлении впуска 6—7 *кгс/см²*, давлении выпуска 0,7 *кгс/см²*, температуре впуска —154 °С и температуре выпуска —186 °С.

Основными являются первые две группы детандеров. Детандеры третьей группы использовались в США для установок производительностью 30 *м³/ч* кислорода, работающих по циклу низкого давления. В отечественных установках такие детандеры не применяются.

### 6.1.2. Рабочий процесс поршневого детандера

Рабочий процесс в поршневом детандере обратен процессу сжатия воздуха в поршневом компрессоре. На рис. 6.1 показана расчетная индикаторная диаграмма детандера, а под ней схематически изображен цилиндр детандера с поршнем и клапанами. Впуску сжатого воздуха через клапан *1* соответствует точка *Е*. Период впуска продолжается до точки *Б* по линии *Е—А—Б*. В точке *Б*, когда поршень пройдет путь $a_1$, клапан *1* закроется и произойдет отсечка; далее поршень будет двигаться на пути $a_2$ вследствие расширения газа в цилиндре детандера.

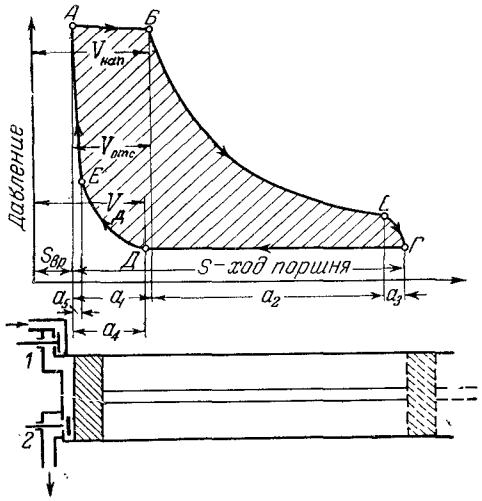



Рис. 6.1. Расчетная индикаторная диаграмма рабочего процесса в детандере: *1* — впускной клапан; *2* — выпускной клапан.

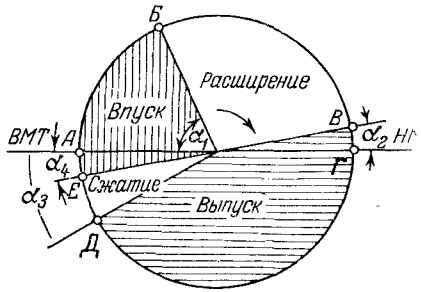



Рис. 6.2. Круговая диаграмма фаз распределения детандера.

Процесс расширения, изображенный кривой *Б—В*, сопровождается понижением давления и температуры воздуха в цилиндре. В точке *В* открывается выпускной клапан *2* детандера, и воздух начинает выходить из цилиндра. Точка *Г* соответствует правому крайнему положению поршня. Дойдя до точки *Г*, поршень вследствие инерции маховика детандера начинает двигаться в обратном направлении, выталкивая расширившийся и охлажденный воздух в выпускной трубопровод. На диаграмме этому процессу соответствует линия *Г—Д*. В точке *Д* выпускной клапан *2* закрывается и по линии *Д—Е* происходит сжатие оставшегося в цилиндре воздуха. В точке *Е* вновь открывается впускной клапан *1* детандера, и процесс повторяется.

Клапаны детандера открываются принудительно от кулачков распределительного вала, а закрываются под действием спиральных пружин. Профиль кулачков рассчитан таким образом, чтобы опережение впуска $a_5$ составляло 1—1,2%, опережение выпуска $a_3$ было равно 2—3,5% и сжатие $a_4$ достигало 3—6% хода поршня.



Ход отсечки $a_1$ устанавливается в зависимости от давления воздуха перед детандером и составляет от 17 до 50% хода поршня (см. рис. 6.4).

Отрезок $S_{вр}$ пропорционален объему вредного пространства, образуемого зазором между поршнем и крышкой цилиндра, а также каналами под клапанами. Вредное пространство обычно составляет от 3 до 5% общего объема цилиндра.

Моменты открытия и закрытия клапанов детандера выбираются по круговой диаграмме фаз распределения в зависимости от углов поворота кривошипа детандера (рис. 6.2).

На практике принимают следующие углы (в градусах):

| | |
|---|---|
| Угол отсечки впускного клапана . . . . . | $\alpha_1$=30—50 |
| » предварения выпуска . . . . . | $\alpha_2$=0—10 |
| » закрытия выпускного клапана . . . . | $\alpha_3$=15—30 |
| » опережения впуска . . . . . | $\alpha_4$=0—10 |

В среднем величина углов $\alpha_2$ и $\alpha_4$ не более 5°, и заметного влияния на режим работы детандера они не оказывают. Наиболее важным является угол отсечки $\alpha_1$, так как от его величины зависит холодопроизводительность детандера и расход воздуха через него. Угол впуска равен сумме углов $\alpha_1$ и $\alpha_4$.

Основными показателями, характеризующими работу детандера, являются удельная холодопроизводительность и расход газа через детандер.

Удельная холодопроизводительность $\Delta i_д$ при заданных начальных параметрах $p_н$, $T_н$ и конечном давлении $p_к$ определяется конечной температурой $T_к$ и равна:

$$\Delta i_д = i_н - i_к \text{ ккал/кг} \tag{6.1}$$

где $i_н$ и $i_к$ — энтальпии газа в начале и конце расширения.

Совершенство рабочего процесса детандера характеризуется адиабатическим коэффициентом полезного действия, представляющим собой *отношение действительного количества холода, полученного при расширении 1 кг воздуха в детандере, к теоретическому (максимально возможному при адиабатическом расширении и тех же начальных давлении и температуре)* т. е.

$$\eta_{ад} = \frac{\Delta i_д}{\Delta i_{ад}} \tag{6.2}$$

Например, при адиабатическом расширении воздуха с избыточного давления 200 до 6 *кгс/см*² и начальной температуре 30 °С можно получить холод в количестве 41,5 *ккал/кг* (173,7 *кдж/кг*). В детандере при тех же условиях получаем фактически 29 *ккал/кг* (121,4 *кдж/кг*). Следовательно, адиабатический к. п. д. детандера

$$\eta_{ад} = \frac{29}{41,5} \cdot 100 = 70\%$$

У поршневых детандеров значения адиабатического к. п. д. могут достигать 80%, но обычно они равны 70—75%. Чем выше адиабатический к. п. д. детандера, т. е. чем эффективнее он работает, тем меньше удельный расход энергии на 1 *кг* воздуха, перерабатываемого в данном холодильном цикле, и тем экономичнее будет работать воздухоразделительная установка.

Весовой расход воздуха через детандер $G_ч$ при отсутствии потерь через клапаны и поршневые кольца равен:

$$G_ч = (V_{нап} \cdot \rho_Б - V_Д \cdot \rho_Д)\, n \cdot 60 \ кг/ч \qquad (6.3)$$

где $V_{нап}$ — объем, занимаемый газом в цилиндре в момент отсечки, $м^3$;
$V_Д$ — объем, занимаемый газом в цилиндре в момент окончания выпуска, $м^3$;
*Б* и *Д* — соответственно моменты отсечки и конца выпуска (см. рис. 6.1);
$\rho$ — плотность воздуха в точках *Б* и *Д*, $кг/м^3$;
$n$ — число оборотов в 1 *мин*.

Действительная холодопроизводительность детандера составит при этом:

$$\Delta I_Д = \Delta i_Д G_ч \ ккал/ч$$

Величины $V_{нап}$ и $V_Д$ определяют по формулам

$$V_{нап} = 0{,}01 \cdot \frac{\pi D^2}{4} S a_1 \ м^3 \text{ за 1 оборот вала} \qquad (6.4)$$

$$V_Д = 0{,}01 \frac{\pi D^2}{4} S a_4 \ м^3 \text{ за 1 оборот вала} \qquad (6.5)$$

где $D$ — диаметр цилиндра, *м*;
$S$ — ход поршня, *м*;
$a_1$ и $a_4$ — моменты отсечки и конца выпуска, % от хода поршня.

При этом принято, что объем вредного пространства $V_{вр} = 0$. При наличии вредного пространства его объем следует прибавлять к величинам $V_{нап}$ и $V_Д$. Например, $V_{нап} = V_{отс} + V_{вр}$.

Как уже указывалось, на практике вредное пространство обычно равно:

$$V_{вр} = (0{,}03 - 0{,}05) \frac{\pi D^2}{4} S$$

где $\frac{\pi D^2}{4} S = V_ц$ — объем, описываемый поршнем за один ход (объем цилиндра).

Холодопроизводительность детандера пропорциональна заштрихованной на рис. 6.1 площади диаграммы, выражающей в определенном масштабе работу, произведенную воздухом в детандере. Действительная индикаторная диаграмма поршневого детандера изображена на рис. 6.3. Она значительно отличается от расчетной рядом дополнительных потерь вследствие сопротивления клапанов, пропуска воздуха через клапаны и поршневые кольца, притока тепла через стенки цилиндра, влияния вредного пространства и др. Например, вследствие сопротивления впускного клапана давление



сжатого воздуха при впуске на участке *А—Б* уменьшается на 10—15%, что сокращает полезную площадь диаграммы и снижает холодопроизводительность детандера. Сопротивление выпускного клапана повышает давление в цилиндре при выталкивании газа поршнем. Это сопровождается уменьшением полезной площади диаграммы, т. е. холодопроизводительности детандера.

Невозможность расширения газа до давления в точке *Г* (см. рис. 6.1) и вынужденная необходимость прекращать расширение в точке *В* при более высоком давлении (путем преждевременного открытия выпускного клапана) уменьшают степень использования работы расширения (холодопроизводительность).

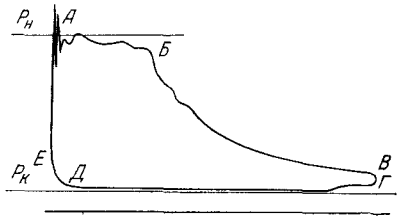



Рис. 6.3. Действительная индикаторная диаграмма поршневого детандера:

*А — Б* — наполнение; *Б — В* — расширение; *В — Г* — опережение выпуска; *Г — Д* — выпуск; *Д — Е* — сжатие; *Е — А* — опережение впуска.

Предварительное сжатие остатка газа перед впуском хотя и снижает холодопроизводительность, но является полезным для обеспечения плавного хода машины и уменьшения нагрузок на механизм движения от инерционных усилий*.

Утечка воздуха через уплотнение поршня детандера также вызывает снижение холодопроизводительности. Вредное пространство уменьшает холодопроизводительность, так как при впуске воздух сжимает оставшийся во вредном пространстве газ, который при этом нагревается, и температура газа в начальной точке диаграммы поднимается выше температуры впускаемого воздуха. Приток теплоты через стенки цилиндра и от трения повышает температуру воздуха в конце расширения.

Важное влияние на холодопроизводительность и адиабатический к. п. д. детандера оказывает степень наполнения. При увеличении хода наполнения $\alpha_1$ (см. рис. 6.1) возрастает количество поступающего в цилиндр воздуха и точка *Б* на индикаторной диаграмме перемещается вправо. В результате увеличивается холодопроизводительность детандера, а удельные потери холода, вызываемые притоком тепла, уменьшаются. Однако при этом вся кривая *Б—В* также переместится вправо, что приведет к повышению давления и температуры воздуха в конце расширения, так как степень расширения уменьшилась. С увеличением до некоторого значения величины наполнения $a_1$ холодопроизводительность детандера и его к. п. д. возрастают, а затем при дальнейшем увеличении наполнения начинают уменьшаться; это обусловлено бо́ль-

* К моменту закрытия выпускного клапана в цилиндре остается воздуха не более 5—6% расхода его через детандер за один ход поршня. Потеря давления во впускном клапане составляет 10—15%.

шим влиянием на работу детандера второго фактора — уменьше ния степени расширения воздуха в цилиндре. Поэтому для каждой величины давления воздуха на входе в детандер существует наи выгоднейшая степень наполнения, при которой холодопроизводи тельность и адиабатический к. п. д. детандера максимальны. Это необходимо учитывать при регулировании детандера.

Холодопроизводительность детандера во время работы регули руют, изменяя давление впускаемого воздуха или степень напол нения. В современных конструкциях детандеров принят способ ре гулирования изменением степени наполнения. Для этого детандер снабжается устройством, с помощью которого можно, не останавли вая машины, изменять зазор меж ду толкателем и впускным кла паном, что приводит к более ран нему или позднему закрытию впускного клапана, соответствен но уменьшая или увеличивая сте пень наполнения.

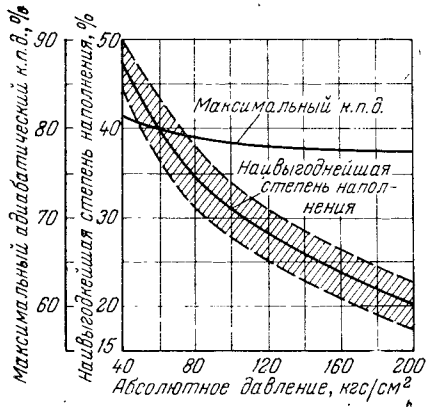



Рис. 6.4. Диаграмма наивыгоднейшей степени наполнения и соответствующий адиабатический к. п. д. детандера в зависимости от величины начального давления (величина избыточного противодавления при выпуске постоянна: $p_к = 5$ *кгс/см²*).

По опытным данным состав лен (ВНИИкриогенмаш) графи определения наивыгоднейших условий работы детандера высо кого давления при давлении за детандером 5 *кгс/см²* (рис. 6.4)

Регулирование холодопроизво дительности детандера дроссели рованием воздуха с помощью впускного вентиля наиболее про сто и не требует изменения по рядка работы распределительных устройств, однако этот способ является недостаточно экономич ным, так как к. п. д. детандера понижается на 5—10%.

В случае необходимости иметь постоянную пониженную произ водительность детандера по сравнению с паспортной уменьшают число его оборотов путем замены шкива электродвигателя на шкив меньшего диаметра.

На работу детандера большое влияние оказывает герметичность клапанов и четкость их работы. Пропуск впускного клапана или его заедание при закрывании повышает давление и температуру воздуха после детандера. Пропуск выпускного клапана вызывает потерю воздуха из цилиндра при впуске и расширении, сопровождающуюся понижением холодопроизводительности и повышением температуры воздуха после детандера.

На рис. 6.5 приведены некоторые индикаторные диаграммы детандера и показано влияние внешних условий на его работу*.

* И. И. Гильман, Труды ВНИИкимаш, вып. 7, 1963.



Энергия расширения воздуха в детандере передается клиноременной передачей на шкив асинхронного электродвигателя переменного тока. При включении в сеть электродвигателя в момент

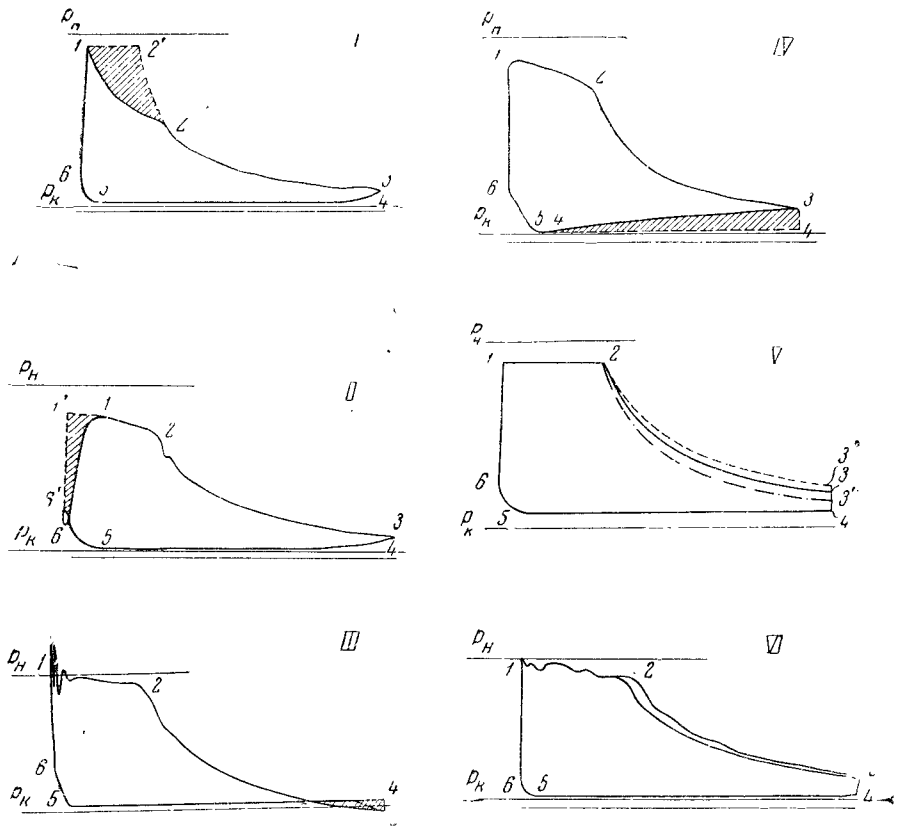



Рис. 6.5. Индикаторные диаграммы детандера (штриховкой показано уменьшение работы, производимой детандером):

*1 — 2* — наполнение; *2 — 3* — расширение; *3 — 4* — опережение выпуска; *4 — 5* — выпуск; *5 — 6* — сжатие; *6 — 1* — опережение впуска; $p_н$ и $p_к$ — начальное и конечное избыточное давление; *I* — дросселирование воздуха на впуске в детандер; *2'* — нормальный процесс; *II* — запаздывание впуска; *1'*, *6'* — нормальный процесс; *III* — образование петли в конце расширения вследствие малой степени наполнения или при слишком большой степени расширения; *IV* — запаздывание выпуска и недостаточный подъем выпускного клапана; *4'* — нормальный процесс; *V* — влияние на процесс расширения неплотности клапанов; *3'* — неплотность впускного клапана, *3''* — неплотность выпускного клапана; *VI* — запаздывание закрытия впускного клапана вследствие того, что слабая пружина не обеспечивает четкой посадки клапана.

пуска он начинает вращать вал детандера. После впуска в цилиндр воздуха и увеличения его количества развиваемая детандером мощность возрастает и он вращает ротор электродвигателя, который начинает теперь работать как генератор переменного тока, отдавая в сеть выработанную электроэнергию.

Работая в генераторном режиме, электродвигатель потребляет из сети ток намагничивания обмоток статора и обеспечивает торможение детандера. В случае исчезновения тормозного момента по какой-либо причине (прекращение подачи тока, обрыв ремня, срез шпонки маховика и пр.) поступление сжатого воздуха в детандер должно немедленно прекращаться, для чего предусматриваются соответствующие автоматические устройства. В противном случае детандер может начать быстро увеличивать число оборотов и, как говорят, «пойдет в разнос», что крайне опасно для машины.

### 6.1.3. Конструкции поршневых детандеров

Многие узлы детандеров сходны с узлами поршневых компрессоров: коленчатый вал с маховиком, рама с опорными подшипниками, шатунно-кривошипный механизм и др. Отличительной особенностью детандеров является наличие у них принудительных клапанов и распределительного механизма.

Конструкция детандера должна обеспечивать: эксплуатационную надежность при длительной, непрерывной работе; хорошее уплотнение поршня в цилиндре и малые потери газа через кольца; герметичность и малое сопротивление клапанов; минимальный приток тепла к рабочему газу; возможность регулирования производительности; надежность защиты при повышении числа оборотов и давления газа в цилиндре. Детандеры передвижных установок должны, кроме того, иметь минимальные габариты и вес.

По конструктивному выполнению детандеры бывают вертикальные и горизонтальные. В СССР наибольшее применение нашли вертикальные однолинейные детандеры с поршнем одностороннего действия.

**Детандер ДВД-2.** В качестве примера конструкции вертикального детандера на рис. 6.6 показано устройство детандера ДВД-2. На основе этой модели в последующем создавались детандеры ДВД-4, ДВД-2М, ДВД-7, ДСД-5, ДСД-70/180, ДВД-70/180. Технические характеристики детандеров см. табл. 6.1.

Картер *22* детандера ДВД-2 имеет два коренных роликовых подшипника, в которых расположен одноколенчатый вал *19*. На картере установлен чугунный средник *8*, заодно с которым отлиты направляющие для ползуна *7*. Шатун *5* соединяет коленчатый вал *19* с пальцем *6* ползуна. С ползуном соединен поршень *9*, двигающийся в цилиндре *10*. Впуск воздуха в цилиндр происходит через впускной клапан *11*, а выпуск — через выпускной клапан *13*. На головке детандера установлен предохранительный клапан *12*. Коленчатый вал снабжен двумя кулачками (впуска *21* и выпуска *20*), открывающими клапаны посредством штоков-толкателей *4* и *17*. Смазка в цилиндр подается масляным насосом *2* высокого давления (лубрикатором), а смазка шатунно-кривошипного механизма производится шестеренчатым насосом *1*. Развиваемая детандером мощность передается электродвигателю переменного тока



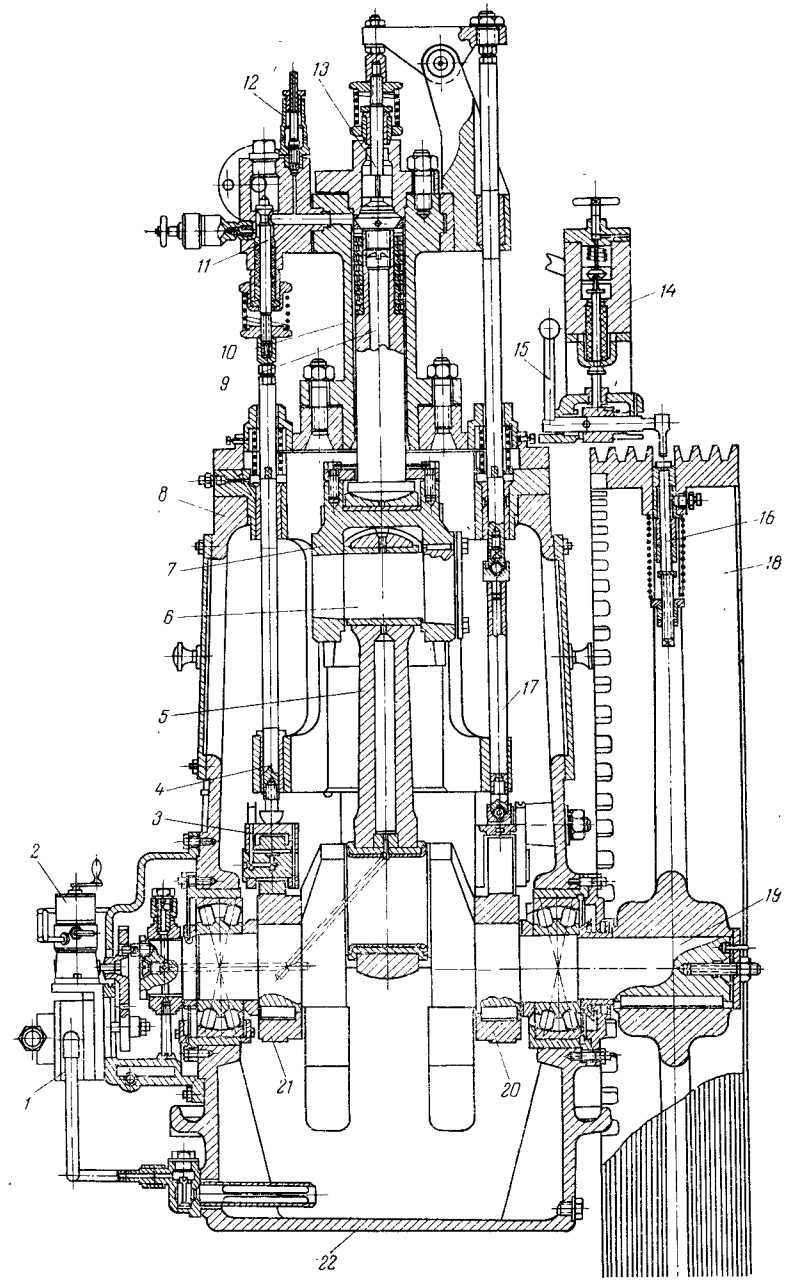



Рис. 6.6. Вертикальный детандер ДВД-2:

*1* — шестеренчатый масляный насос; *2* — масляный насос высокого давления (лубрикатор); *3* — кулисный механизм; *4*, *17* — штоки-толкатели; *5* — шатун; *6* — палец ползуна; *7* — ползун; *8* — средник; *9* — поршень; *10* — цилиндр; *11* — впускной клапан; *12* — предохранительный клапан; *13* — выпускной клапан; *14* — клапан автоматического выключения подачи воздуха; *15* — рычаг экстренного торможения; *16* — центробежный выключатель; *18* — маховик; *19* — коленчатый вал; *20* — кулачок выпуска; *21* — кулачок впуска; *22* — картер.

через клиноременную передачу, для чего маховик *18* имеет на ободе шесть канавок.

Регулирование холодопроизводительности детандера осуществляется изменением отсечки впускного клапана. Для этого в детандере предусмотрен кулисный механизм *3*, изменяющий положение ролика, передающего усилие от распределительного кулачка к толкателю клапана. При этом центр ролика смещается навстречу вращению кулака и ролик опускается, что увеличивает зазор между бойком и толкателем. Уменьшение угла поворота кулака при

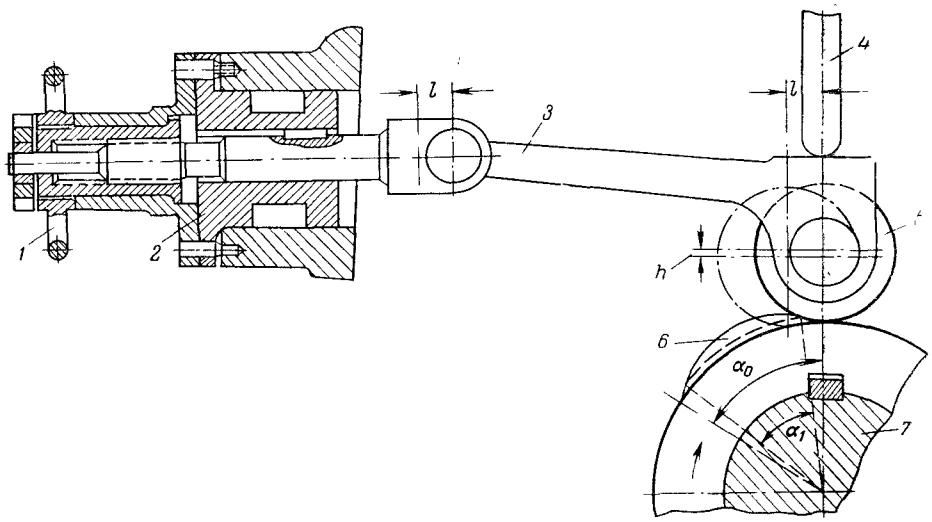



Рис. 6.7. Регулирование производительности детандера путем изменения момента отсечки (для вертикальных машин):

*1* — маховичок регулятора; *2* — направляющая втулка; *3* — кулиса; *4* — толкатель впускного клапана; *5* — ролик кулисы; *6* — кулачок; *7* — вал; *l* и *h* — смещение оси ролика соответственно по горизонтали и по вертикали; $\alpha_0$ — нормальный угол впуска; $\alpha_1$ — угол после уменьшения степени наполнения.

смещении ролика и увеличение зазора обеспечивают более раннее закрытие впускного клапана, т. е. уменьшает наполнение цилиндра и приближает момент отсечки. Пример конструктивного выполнения регулятора производительности детандера показан на рис. 6.7

Для предохранения детандера от разноса в случае внезапного сбрасывания нагрузки на маховике *18* имеется центробежный выключатель *16* (см. рис. 6.6). Если детандер пойдет в разнос и число оборотов маховика превысит допустимое, груз выключателя под действием центробежной силы выдвинется за обод маховика и ударит по рычагу, который закроет клапан *14* и таким образом прекратит подачу воздуха высокого давления в цилиндр детандера.



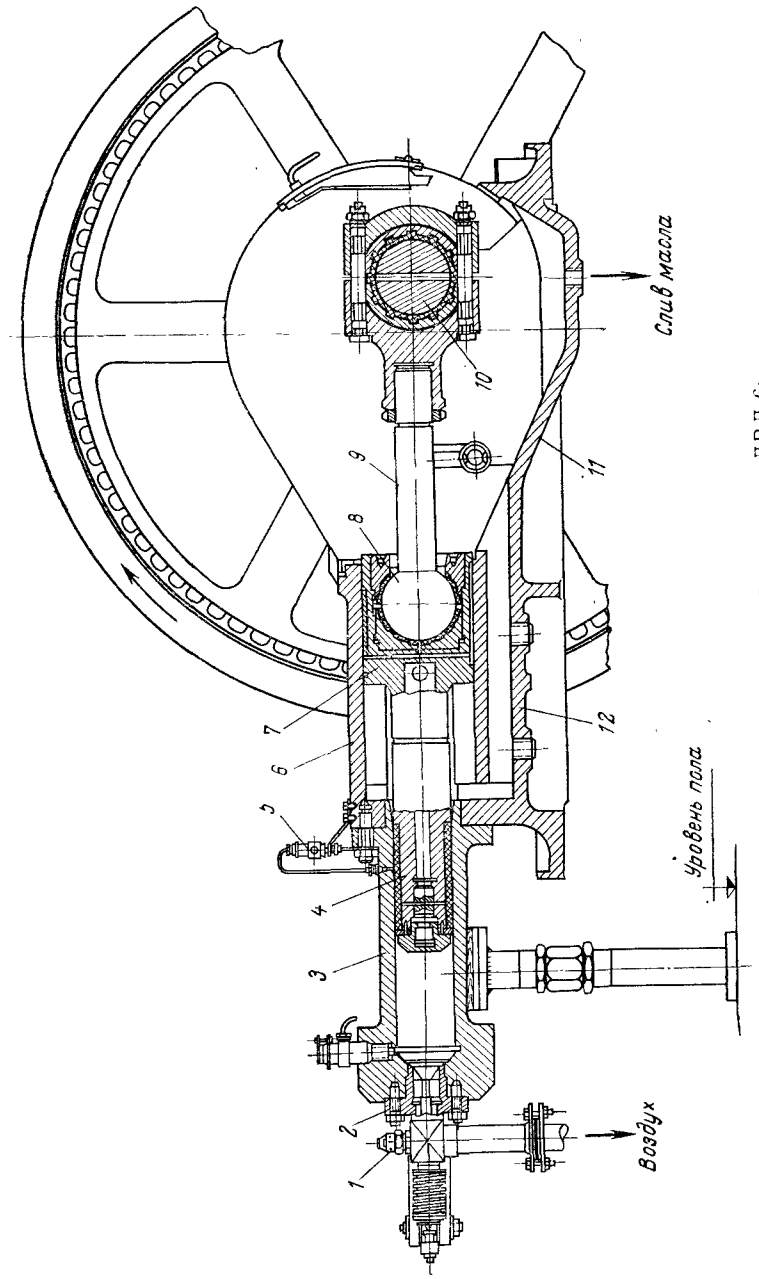



Рис. 6.8. Горизонтальный детандер ДВД-6:

*1* — колпачок предохранительной мембраны; *2* — выпускной клапан; *3* — цилиндр; *4* — поршень; *5* — глазок; *6* — направляющие; *7* — ползун; *8* — шаровая головка шатуна; *9* — шатун; *10* — коленчатый вал; *11* — станина; *12* — цилиндрический прилив.

Шатунно-кривошипная база (рама, механизм движения), а также системы смазки и регулирования детандера ДВД-2 используются и в других вертикальных детандерах.

Рычаг *15* (см. рис. 6.6) служит для ручной экстренной остановки и торможения детандера.

Поршень детандера наборный, имеет семь промежуточных колец, между которыми расположены пружинящие стальные кольца. Поверх последних надето по два уплотнительных кольца из перлитного чугуна. Такая конструкция поршня сокращает утечку воздуха через поршневое уплотнение, поскольку число колец увеличено при той же длине поршня.

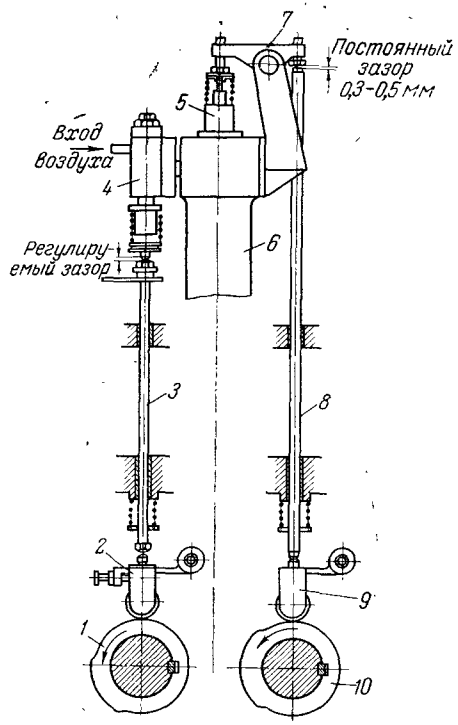



Рис. 6.9. Схема распределительных органов детандера ДВД-6:

*1* — кулачок впуска; *2* — кулиса впуска; *3* — толкатель впускного клапана; *4* — впускной клапан; *5* — выпускной клапан; *6* — цилиндр; *7* — коромысло выпуска; *8* — толкатель выпускного клапана; *9* — кулиса выпуска; *10* — кулачок выпуска (кулачки и кулисы условно изображены повернутыми в плоскость чертежа).

**Детандер ДВД-6.** В качестве примера конструкции горизонтального детандера на рис. 6.8 показан детандер ДВД-6. Чугунная станина *11* имеет цилиндрический прилив *12*, в котором размещены направляющие *6* (отлитые заодно со станиной). На станине шпильками укреплен стальной цилиндр *3*, в котором перемещается чугунный поршень *4*. Последний скреплен с цилиндрическим ползуном *7*, который с помощью шаровой головки *8* соединен с шатуном *9*. Движение поршня *4* передается через ползун и шатун коленчатому валу *10*, расположенному в коренных подшипниках станины детандера. Впускной клапан (на рисунке не показан) и выпускной клапан *2* расположены в головке цилиндра. Смазка подается от лубрикатора в теплую часть цилиндра через глазок *5*.

На корпусе выпускного клапана установлена предохранительная мембрана из алюминиевой фольги, закрытая колпачком *1*. Толщина фольги для мембраны подбирается экспериментально путем испытания 10% всего количества приготовленных мембран на разрыв при избыточном давлении 20—25 *кгс/см*². Предохранительная мембрана защищает выпускной трубопровод детандера от повышения в нем давления до опасных пределов, что может произойти при заедании выпускного клапана в открытом положении. При повышении давления возможен разрыв выпускной трубы.



Схема распределительных органов детандера ДВД-6 приведена на рис. 6.9, а схема смазки механизма движения и цилиндра — на рис. 6.10 (втулки толкателей и ось коромысла смазываются солидолом).

На щеке коленчатого вала детандера ДВД-6 установлен центробежный выключатель (рис. 6.11), предохраняющий машину от разноса при недопустимом увеличении числа оборотов. В этом

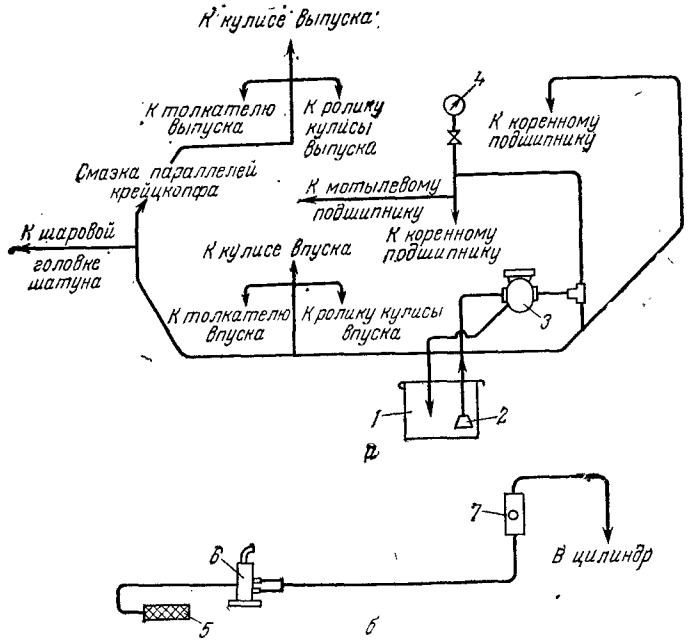



Рис. 6.10. Схема смазки механизма движения (*а*) и цилиндра (*б*) детандера ДВД-6:

*1* — масляный бак; *2* — обратный клапан с фильтром; *3* — шестеренчатый масляный насос; *4* — манометр; *5* — масляный фильтр; *6* — лубрикатор; *7* — глазок для контроля подачи смазки.

случае груз *7* под действием центробежной силы выдвигается, сжимает пружину *6* и ударяет по рычагу *5*, который освобождает боек *4*. Пружиной *2* боек *4* выбрасывается из кулисы, и воздействие его на конец толкателя *3* впускного клапана прекращается.

Детандер снабжен также автоматическим устройством, останавливающим машину при внезапном выключении тока в цепи тормозного электродвигателя.

На основе опыта эксплуатации детандеров ДВД-6 первых выпусков в конструкцию их внесен ряд улучшений, а именно: применено более надежное крепление головки поршня; установлены спе-

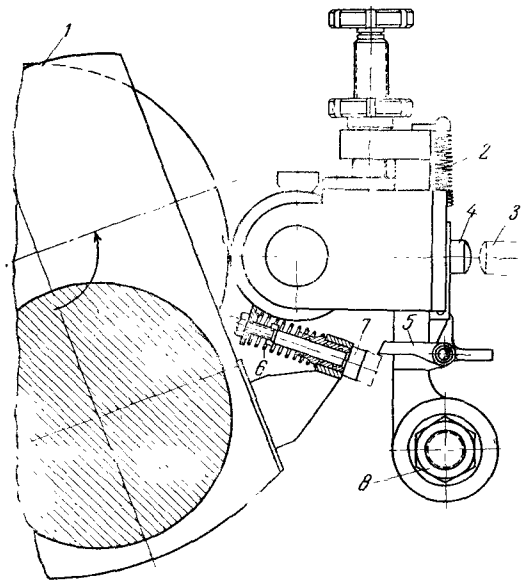



Рис. 6.11. Центробежный выключатель детандера ДВД-6:
*1* — коленчатый вал; *2*, *6* — пружины; *3* — толкатель; *4* — боек; *5* — рычаг; *7* — груз; *8* — кулиса впуска.

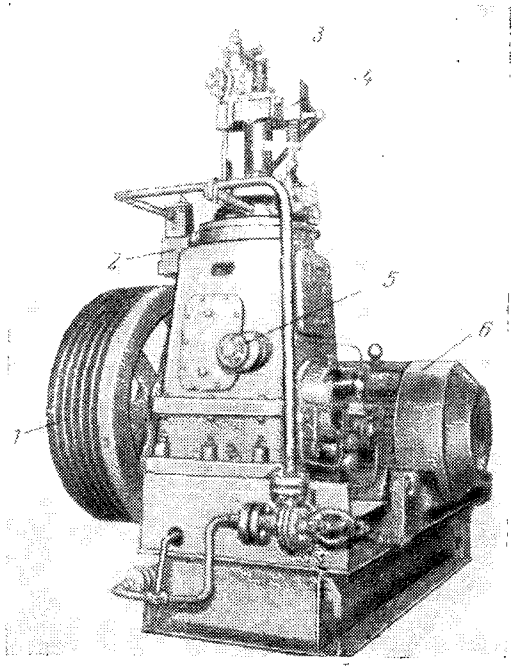



Рис. 6.12. Поршневой детандер ДВД-12:
*1* — маховик; *2* — автоматический клапан; *3*, *4* — выпускной и впускной клапаны; *5* — маховичок; *6* — двигатель.

циальные маслослизывающие чугунные кольца; баббитовое уплотнение штока впускного клапана заменено кожаным; установлен уравнитель давления перед разрывной предохранительной мембраной на трубопроводе между детандером и фильтром; упрощена конструкция кулисы благодаря исключению практически ненужного устройства для регулирования угла опережения впуска; подложены шайбы под бойки коромысла выпускного клапана для преду-

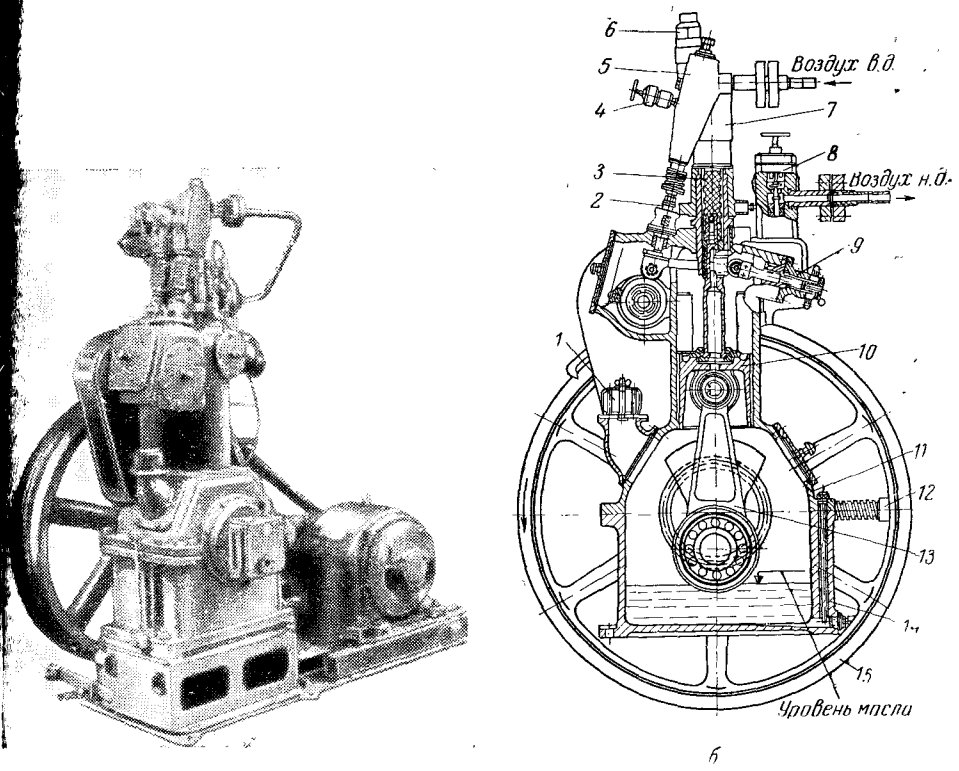



Рис. 6.13. Поршневой детандер ДВД-13:
*а* — общий вид; *б* — разрез; *1* — сапун; *2* — промежуточный толкатель; *3* — поршень; *4* — пресс-масленка; *5* — впускной клапан; *6* — предохранительная мембрана; *7* — цилиндр; *8* — клапан автоматического выключения подачи воздуха; *9* — регулятор производительности (хода отсечки); *10* — крейцкопф; *11* — средник; *12* — центробежный выключатель; *13* — шатун; *14* — картер; *15* — маховик.

преждения их изгиба и поломки; изменен способ сборки и крепления маховика, что исключает возможность его разрушения, и т. п.

На основе опыта эксплуатации поршневых детандеров в последующие годы была продолжена разработка новых конструкций этих машин с целью повышения их надежности и эксплуатационных показателей. В качестве примера на рис. 6.12 показан детандер ДВД-12, а на рис. 6.13 — детандер ДВД-13.

Детандер ДВД-12 весит на 35% меньше, чем детандеры прежних конструкций такой же производительности.

Производительность детандера ДВД-12 регулируют изменением момента отсечки впускного клапана *4* маховичком *5* (см. рис. 6.12). Торможение производится асинхронным электродвигателем типа АО-93-6Т (1000 *об/мин*, напряжение 220/380 *в*), работающим в генераторном режиме. Детандер установлен на чугунной раме с разъемом по оси коленчатого вала.

На верхней части рамы укреплена съемная параллель с направляющими для толкателей клапанов. Вал одноколенный и опирается на два сферических роликоподшипника. На валу посажены кулаки механизма распределения клапанов впуска и выпуска, а на консольной части вала — маховик *1* с канавками для клиноременной передачи. Верхняя головка шатуна закрытая, с бронзовой втулкой; нижняя головка разъемная и имеет вкладыши с баббитовой заливкой. Соединение поршня с крейцкопфом самоустанавливающееся. Поршень удлиненный, с двумя разрезными направляющими втулками; уплотняется пятью комплектами наборных поршневых колец; в нижней части поршня имеется маслосъемное кольцо.

Цилиндр стальной, установлен на раме. На цилиндре укреплены выпускной *3* и впускной *4* клапаны, а также кронштейн с рычагом для выпускного клапана. Впускной клапан шариковый, выпускной — шпиндельный, тарельчатый; сальник впускного клапана набран из кожаных манжет, а выпускного — снабжен набивкой из асбестового пропитанного шнура.

Смазка в цилиндр подается через контрольный глазок плунжерным лубрикатором, приводимым в движение от коленчатого вала. Механизм движения, толкатели и кулисы смазываются с помощью шестеренчатого насоса от системы циркуляционной смазки. Направляющие втулки толкателей и сальник штока впускного клапана смазываются солидолом через пресс-масленки.

Детандер снабжен центробежным предохранителем от разноса, действующим на автоматический клапан *2*, который прекращает подачу воздуха в цилиндр при недопустимом увеличении числа оборотов вала.

**Детандер ДВД-13.** Этот детандер (см. рис. 6.13) отличается от детандера ДВД-12 тем, что клапаны впуска и выпуска для уменьшения объема вредного пространства расположены наклонно (под углом 15°) к оси цилиндра. Для уменьшения инерционных сил механизма привода клапанов сокращено расстояние между распределительным кулачковым валом и клапанами. Длина цилиндра увеличена, и поршневое уплотнение удалено от полости, в которой происходит расширение воздуха, с целью уменьшения притока тепла к расширяющемуся газу. Цилиндр изготовлен из стали 12ХН3А и снабжен сменной рабочей втулкой из стали 20 с цементированной рабочей поверхностью.

Рама из чугуна состоит из картера и средника, с плоскостью разъема по оси вала. Коленчатый вал разъемный. Коренные шейки



вала снабжены сферическими двухрядными подшипниками, расположенными в стальных стаканах. Внутренняя цилиндрическая часть средника служит направляющей для крейцкопфа. В верхней части средника расположены кулачковый вал, рычаги и регулятор производительности.

Поршень (рис. 6.14) установлен на опорной сферической пяте, расположенной в верхней части крейцкопфа. Головка поршня *3* изготовлена из текстолита*. Поршень наборный с четырьмя комплектами уплотняющих колец *2*, ниже которых расположено маслосъемное кольцо *1*.

Впускной клапан детандера (см. рис. 6.15, *в*) шариковый, выпускной — шпиндельный конусный; шпиндели клапанов уплотняются кожаными полуворотничками. Седла сменные.

Адиабатический к. п. д. детандеров ДВД-12 и ДВД-13 равен 0,68—0,70.

**Детандеры ЗаД-18/40, ЗаД-11/50 и ЗаД-6/200.** На основе разработанного типового ряда созданы детандеры среднего давления ЗаД-18/40 и ЗаД-11/50 для воздухоразделительных установок АК-1,5 и К-0,4 и детандер высокого давления ЗаД-6/200, используемый для ожижительной установки ВЖ-0,02 на линии циркуляции азота или взамен детандера ДВД-70/180 для комплектации воздухоразделительных установок. Эти детандеры спроектированы на единой шатунно-кривошипной базе ЗаД с максимальным усилием 10 *Т* и скоростью вращения вала до 400 *об/мин*. Поршни снабжены уплотнительными кольцами из армированного фторопласта с графитом и работают без смазки. Клапаны-прямоточные. Впускной клапан закрытого типа с внутренней пружиной и неметаллическими направляющими.

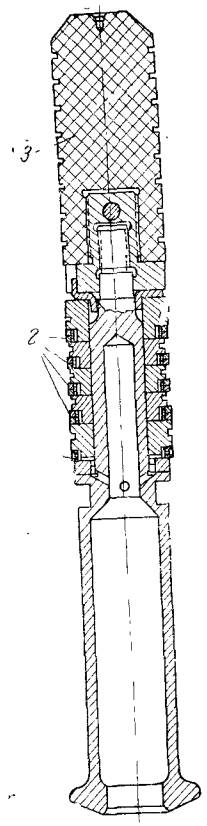



Рис. 6.14. Поршень детандера ДВД-13:
*1* — маслосъемное кольцо; *2* — уплотняющие кольца; *3* — головка поршня.

Цилиндр детандера в верхней части снабжен теплоизоляцией и ограждан металлическим кожухом, обклеенным изнутри металлической фольгой для уменьшения потерь холода в окружающую среду.

* Головка поршня из текстолита может нагреться и даже возгореться в случае проникновения в цилиндр пыли адсорбента из блока осушки и образования с маслом абразивной пасты. Поэтому следует тщательно фильтровать воздух от пыли. В других детандерах (ДВД-10) текстолитовые головки поршней заменены полыми, изготовленными из малотеплопроводной нержавеющей стали с заполнением изоляцией.

Для защиты от разноса применен автоматический клапан-захлопка на впускном воздухопроводе и центробежный выключатель, расположенный на кулачковом валу. Смазка механизма движения осуществляется шестеренчатым насосом. При пуске детандера для повышения его холодопроизводительности можно повышать число оборотов с помощью трехскоростного электродвигателя. Уменьшить производительность можно также с помощью кулисы, действующей на впускной клапан и сокращающей отсечку.

**Поршневые уплотнения.** В детандерах нашли применение следующие виды поршневых уплотнений: металлические кольца, смазываемые маслом; поршневые уплотнения из пластмасс, работающие без смазки. В конструкциях поршневых детандеров низкого давления зарубежных фирм применялись также детандеры с уплотнениями поршней манжетами из обезжиренной кожи* и со щелевым уплотнением, смазываемым маслом.

В детандерах с масляной смазкой цилиндров применяют кольца из перлитного чугуна, подобные тем, которые используются в поршневых воздушных компрессорах. Иногда используются кольца из латуни, наплавленные баббитом.

Для смазки цилиндров детандера с металлическими поршневыми кольцами используются: веретенное масло АУ (ГОСТ 1642—50*), трасформаторное масло (ГОСТ 982—68) и масло ХА фригус (ГОСТ 5546—66) соответственно указаниям инструкции по эксплуатации. Эти масла отличаются малой вязкостью и низкой температурой застывания. Масло ХА применяется также для смазки сальников аммиачных компрессоров. Характеристика указанных масел приводится ниже:

| | Веретенное АУ | Трансформаторное | ХА (фригус) |
|---|---|---|---|
| Вязкость при 50 °С, *сст* | 12—14 | 9,6 | 11,5—14,5 |
| Температура застывания, °С | —45 | —45 | —40 |

Применение для поршневых уплотнений антифрикционных материалов, работающих без смазки цилиндров детандера, позволяет создавать надежные и простые в эксплуатации низкотемпературные поршневые детандеры. Отсутствие масла в цилиндрах не требует дополнительных устройств для очистки воздуха от примеси масла, уменьшает габариты и повышает взрывобезопасность воздухоразделительных установок, упрощает и удешевляет их эксплуатацию, снижает себестоимость получаемых продуктов разделения воздуха.

Для таких уплотнений используются материалы на основе фторопласта. Зарубежные фирмы рекомендуют, например, кольца из армированного стекловолокном фторопласта, наполненного (15—20% по весу) дисульфидом молибдена. Применяют кольца из металлополимерного материала с пропиткой или втиранием смеси фторопласта с 20% дисульфида молибдена.

В отечественных детандерах для этих целей используются фторопластовый материал Ф4-К20 (ВТУП-186—68) и фторопластографитовый материал АФГМ (ТУ 01-26—68). Ориентировочный ресурс работы уплотнений из указанных материалов для детандеров высокого давления составляет 1500—2500 *ч*.

ВНИИкриогенмаш для поршневых детандеров высокого давления рекомендует испытанные им металлопластмассовые кольца из материала К-23, для которых расчетный ресурс работы составляет 10 000 *ч* (при износе по толщине 0,4 *мм*).

На одном из предприятий успешно применяют для детандера ДСД-5 поршневые кольца из текстолита, изготовленные по размерам чугунного кольца. Для придания кольцам упругости после изготовления их надевают на металлическую оправку и выдерживают 20—25 *мин* в масляной ванне при 70—75 °С. Такие кольца работают без смены в течение 3—4 месяцев*. Текстолитовые кольца используются также за рубежом в поршневых детандерах среднего и низкого давления.

На Новомосковском химическом комбинате для поршневых детандеров ДВД-6 применяют кольца из армированного фторопласта АФГ-80ВС. Для хорошей работы этих колец необходимо, чтобы цилиндр внутри был обработан по 8—10 классу чистоты поверхности. В этом случае кольца служат 7—8 месяцев.

**Клапаны детандеров.** Высокие требования предъявляются к клапанам в отношении их надежности и долговечности работы. В поршневых детандерах применяют клапаны различной конструкции: толкающие и тянущие; неразрезные и разрезные; тарельчатые и шариковые; неразгруженные и разгруженные.

Наибольшее применение получили неразгруженные разрезные и шпиндельные клапаны толкающего типа, тарельчатые и шариковые (на впуске), с сальниковым уплотнением из кожи или армированного фторопласта-4.

Клапаны должны обеспечивать минимальные скорости прохождения воздуха, постоянство скорости воздуха во всех сечениях клапана, прямоточность. Допускаются следующие средние скорости газа в клапанах: для впускных 25—40 и выпускных 20—30 *м/сек*.

Наиболее жесткие требования предъявляют к впускному клапану, так как от него во многом зависит нормальная работа, холодопроизводительность и к. п. д. детандера. Конструкции впускных клапанов показаны на рис. 6.15. Клапан с конусным уплотнением (рис. 6.15, *а*) изготовляется из нержавеющей хромоникелевой

* Кожаные манжеты пригодны для относительно тихоходных машин, у которых средняя скорость поршня в пределах 0,6—1,2 *м/сек*; при уплотнении поршня чугунными кольцами скорость может достигать 2—3 *м/сек*. Детандеры с уплотнением поршня кожаными манжетами работают при давлении впуска от 15 до 30 *кгс/см²* и температуре на входе от —100 до —120 °С. Кожа должна быть специально обработана с тем, чтобы она не теряла эластических свойств при низких температурах.

* Кислородная промышленность, № 3, НИИТЭхим, 1969.

стали марки 1Х18Н9Т, и поверхность его азотируется. Клапан *4* и шток *2* выполнены в виде двух отдельных деталей, и между ними в сборке имеется зазор 0,3 *мм*. Такая конструкция уменьшает инерцию клапана, обеспечивает его плавную посадку и отсутствие перекосов. При повышении давления в цилиндре выше давления впуска клапан *4* поднимается и перепускает воздух из цилиндра в подводящий трубопровод.

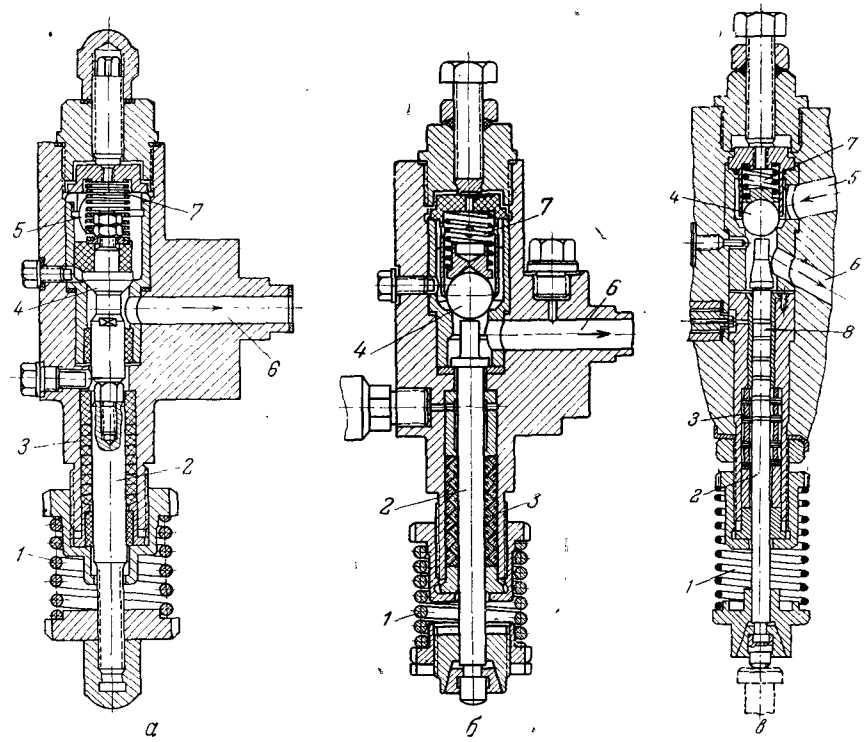



Рис. 6.15. Впускные клапаны детандера:

*а* — с конусным (тарельчатым) уплотнением; *б* и *в* — с шариковым уплотнением; *1* — наружная пружина; *2* — шток; *3* — сальниковая набивка; *4* — клапан; *5* — канал впуска воздуха в корпус клапана; *6* — канал впуска воздуха в цилиндр; *7* — обратная пружина клапана. *8* — лабиринтное уплотнение.

Клапаны с шариковым уплотнением (рис. 6.15, *б* и *в*) также используются в детандерах. Как показала практика, шариковые клапаны надежно работают в течение 700—1200 *ч* без ремонта. В этих клапанах применяют шарики от шарикоподшипников. Седло клапана изготовляется из Ст. 45, закаленной до твердости *HRC*40—45.

На опыте работы Балашихинского кислородного завода установлено, что хорошим уплотнением для сальника штока клапанов



детандера является набивка «елочного» типа из пропарафиненных кожаных шайб, работающая без смазки длительное время.

В качестве выпускных применяют клапаны тарельчатого типа из стали 1Х18Н9Т, снабженные направляющими ребрами. Уплотнение сальников выпускных клапанов делается из обезжиренной кожи, пропрафиченного асбеста, свинцово-графитовое или фторопласта-4 с наполнителями (без смазки).

**Смазка детандера.** Подача смазки в цилиндр детандера, работающего с металлическими поршневыми кольцами, должна быть точно отрегулирована. При избытке смазки забиваются выпускные клапаны и фильтры, установленные после детандера, а иногда происходит и разрыв фильтрующей ткани, что может привести к уносу большого количества масла в воздухоразделительный аппарат.

Количество подаваемого в цилиндр масла зависит от размеров цилиндра детандера и указывается в инструкции по эксплуатации. Например, для детандеров ДВД-70/180 и ДВД-6 в цилиндр подается соответственно 1—2 и 2—4 капли масла в 1 *мин*. Точную дозировку масла в цилиндр детандера можно обеспечить с помощью пневматического лубрикатора. Конструкция такого лубрикатора показана на рис. 6.16.

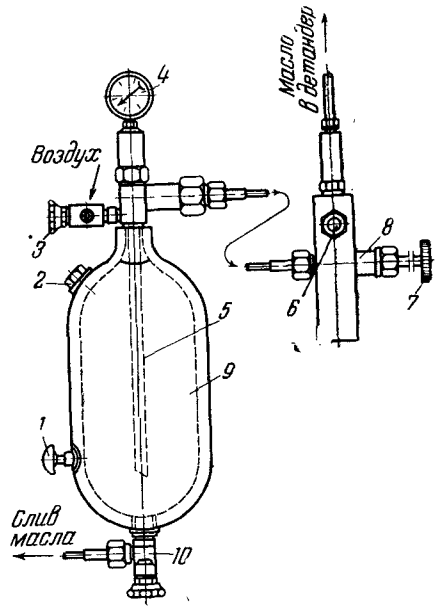



Рис. 6.16. Пневматический лубрикатор (конструкции Иванова):

*1* — кран; *2* — пробка; *3*, *8* и *10* — вентили; *4* — манометр; *5* трубка; *6* — контрольный глазок; *7* — маховичок; *9* — баллон.

Масло заливают в баллон *9* емкостью 3—5 *дм*³ через пробку *2*, а затем по трубке *5* в баллон через редуктор подается воздух (или азот) под постоянным избыточным давлением от 5 до 15 *кгс/см*²; давление в лубрикаторе контролируется манометром *4*. Под давлением воздуха масло вытесняется из баллона по трубке *5* и через контрольный глазок *6* поступает в цилиндр детандера. Количество масла, направляемого в цилиндр, регулируется вентилем *8* с помощью маховичка *7*; шток вентиля *8* имеет на конце конус и снабжен мелкой (микрометрической) резьбой. Кран *1* служит для контроля количества масла в баллоне, а вентиль *10* для слива масла из лубрикатора.

Для смазки шатунно-кривошипного механизма детандеров применяются индустриальные масла марок: 30—машинное Л, 45—ма-

шинное С и 50—машинное СУ (ГОСТ 1707—51). К местам смазки рабочих поверхностей масло подается с помощью шестеренчатого масляного насоса или разбрызгиванием.

**Защитные устройства.** Некоторые устройства для защиты детандера от разноса были упомянуты выше при описании конструкции отдельных типов детандеров. В качестве одного из таких устройств используется пневматический клапан-захлопка, работающий в комплекте с центробежным выключателем и приказным клапаном. Клапан-захлопка и центробежный выключатель показаны на рис. 6.17 и 6.18.

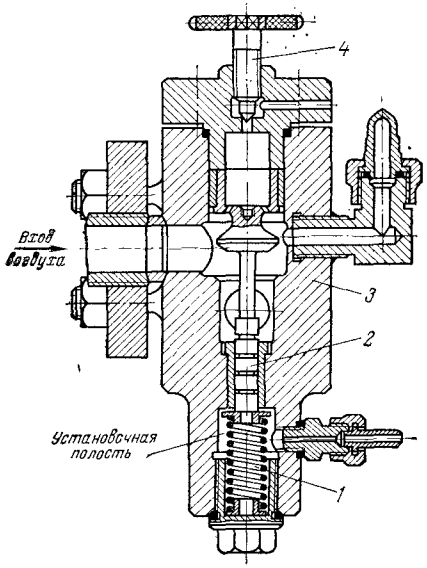



Рис. 6.17. Клапан-захлопка:
1 — пружина; 2 — клапан; 3 — корпус; 4 — вентиль.

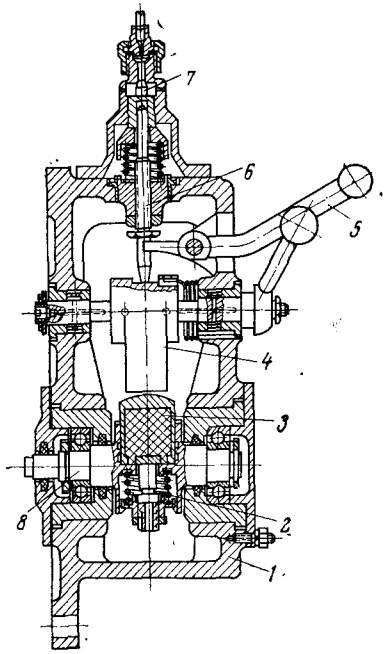



Рис. 6.18. Центробежный выключатель:
1 — корпус; 2 — пружина; 3 — груз; 4 — рычаг кулачка; 5 — возвратный рычаг; 6 — шток клапана; 7 — приказной клапан; 8 — валик.

Отсутствие в клапане сальника практически исключает возможность его заедания и обеспечивает безотказность работы. Клапан-захлопка удерживается в открытом состоянии пружиной и срабатывает при падении давления в уравнительной полости под клапаном.

Сброс давления из полости производится приказным клапаном центробежного выключателя. При нормальных условиях этот клапан закрыт. При превышении установленного числа оборотов вала детандера груз выключателя ударяет по рычагу кулачка, который поворачивается, и шток клапана, открываемого пружиной приказ-



ного клапана, опускается. Клапан открывается, сбрасывает давление из уравнительной полости клапана-захлопки, и последний садится на свое седло. В результате поступление воздуха высокого давления в детандер прекращается. Клапан-захлопка устанавливается на воздухоподводящей трубе в любом месте.

На одном из заводов для защиты детандеров от разноса применяется способ, основанный на использовании энергии батареи статических конденсаторов при торможении и автоматического включения детандера при кратковременных значительных снижениях напряжения*. В случае отключения пусковых аппаратов от сети детандер продолжает работать в нормальном режиме от батареи конденсаторов, включенных параллельно обмотке статора электродвигателя. Для поддержания нормального (или близкого к нему) числа оборотов автоматически включается балластное сопротивление. При восстановлении напряжения детандер автоматически включается при помощи дополнительно подключенного реле времени типа РВП. Описанный способ успешно применяется уже более двух лет.

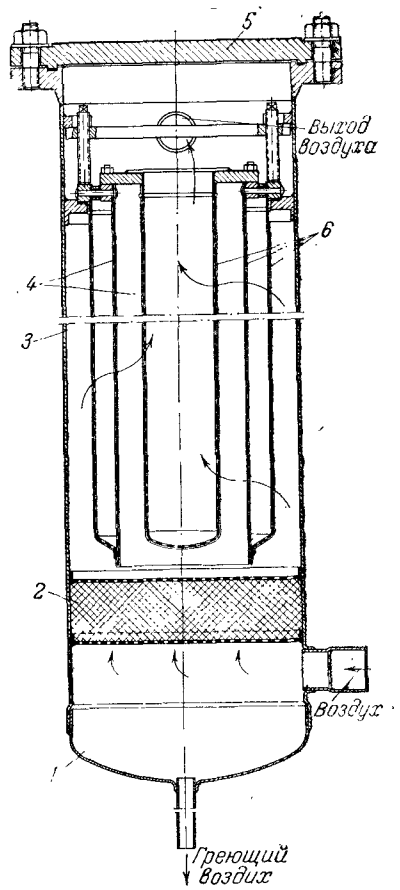



Рис. 6.19. Детандерный фильтр:
1 — днище; 2 — насадка; 3 — обечайка; 4 — стаканы; 5 — крышка; 6 — чулки

**Детандерные фильтры.** Когда цилиндры поршневых детандеров высокого давления смазываются маслом, не исключается возможность уноса его холодным воздухом в воздухоразделительный аппарат, где накопление масла создает опасность взрыва.

Из картера горизонтального детандера в цилиндр может также попадать машинное масло. Для устранения этого на торце цилиндра или на поршне ставятся маслослизывающие чугунные кольца, предупреждающие попадание машинного масла в цилиндр.

Для очистки детандерного воздуха от масла за детандером устанавливают маслоулавливающие детандерные фильтры (рис. 6.19). Такой фильтр представляет собой латунный сварной

* Кицис С. И., Шнаревич Д. И., Способ автоматической защиты детандеров от разноса, Промышленная энергетика, № 4, (1967).

Таблица 6. 1. Техническая характеристика поршневых детандеров*

| | ЗаД-18/40 | ЗаД-11/50 | ЗаД-6/200 | ДВД-6 | ДСД-5 | ДВД-2М** | ДВД-11 | ДВД-12 | ДВД-13 | ДВД-70/180** | ДСД-70/180 | ДВД-10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Кислородная установка | АК-1,5 | К-0,4 | ВЖ-0,02 | КЖ-1 | УКГС-100 | КГ-300-2Д, КГ-300М и КТ-1000М | СКАДС-17, ЖА-20 и УКА-0,11 | — | — | КЖ-150, КГ-300М, КТ-1000М, ЖА-300М | КГСН-150, АКГСН-960 | — |
| Диаметр цилиндра, *мм* | 130 | 130 | 70 | 155 | 80 | 70 | 28 | 80 | 50 | 70 | 70 | 85 (два цилиндра) |
| Ход поршня, *мм* | 190 | 190 | 190 | 290 | 180 | 180 | 130 | 180 | 160 | 180 | 180 | 190 |
| Число оборотов вала в 1 *мин* | 200/300 | 187/370 | 248 | 145 | 180 | 180 | 320 | 300 | 300 | 200 | 180 | 350 |
| Производительность, $м^3/ч$ | | | | | | | | | | | | |
| при пуске | 1100 | 670 | 370 | 3000 | 300—350 | 170/660*** | 60 | 800 | 250 | 340 | — | 2500 |
| при работе | — | — | — | 2000 | 180—200 | 120/325 | 60 | 500 | 150 | — | 190 | — |
| Температура воздуха, °С | | | | | | | | | | | | |
| перед детандером | —100 | —100 | 27 | —35 | От —45 до —50 | 30 | От 10 до 20 | 20 | 0—25 | 20 | От —45 до —50 | 20 |
| после детандера | | | | | | | | | | | | |
| при пуске | — | — | —128 | — | От —110 до —120 | —120 | —110 | —120 | От —120 до —150 | —120 | —120 | —110 |
| при работе | — | — | — | От —135 до —165 | От —100 до —105 | —88/—98*** | —110 | — | — | —100 | —105 | — |
| Избыточное давление воздуха, $кгс/см^2$ | | | | | | | | | | | | |
| перед детандером | | | | | | | | | | | | |
| при пуске | 40 | 50 | 200 | 200 | 50 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 70 | 190 |
| при работе | — | — | — | 170 | 30—33 | 90/120*** | 200 | — | — | 120—140 | 55 | — |
| после детандера | 6 | 6 | 6 | 6—16 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 |
| Мощность электрогенератора—тормоза, *квт* | — | — | — | 130 | 7 | 20 | 2,8 | 55 | 14 | 14 | 14 | 125 |
| Вес детандера, *Т* | — | — | 4,0 | 7,06 | 1,14 | 1,14 | 0,48 | 2,7 | 0,86 | 3,3 | 3,3 | 5,4 |
| Расход масла | | | | | | | | | | | | |
| для смазки цилиндров | | | | | | | | | | | | |
| веретенное марки АУ, *л/мес* | Без смазки | | | 8 | 8 | 8 | ~11 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 |
| для смазки механизма движения, *кг/мес* | | | | | | | | | | | | |
| солидол марки М(ГОСТ 1033—51*) | Согласно инструкции по смазке детандера | | | — | 2—3 | 2—3 | 2—3 | 2—3 | 2—3 | 2—3 | 2—3 | — |
| машинное марки С | | | | 60—70 *кг/мес* | Согласно инструкции по смазке детандера | 6 *л* на 600 *ч* работы | | | | Согласно инструкции по смазке детандера | | |

* Все детандеры вертикальные, однолинейные, кроме: ДВД-6—горизонтального, однолинейного и ДВД-10—вертикального двухлинейного;
** Детандер ДВД-2М заменяет детандеры ДВД-2 и ДВД-4. Детандеры ДВД-70/180 и ЗаД-6/200 заменяют детандеры ДВД-2М и ДСД-5.
*** В числителе указаны показатели детандера для установки КГ-300М в знаменателе—для КТ-1000М.

сосуд с цилиндрической обечайкой *3*, выпуклым днищем *1* и крышкой *5*. В сосуд вставлены три латунных цилиндрических стакана *4* с отверстиями; на стаканы надеты чулки *6* из шинельного сукна. Устанавливают два основных фильтра, работающие попеременно. К ним добавляют еще третий (контрольный), включаемый последовательно. Контрольный фильтр предназначен для улавливания частиц масла, прошедших через основные фильтры, и имеет такую же конструкцию. Детандерный воздух поступает в фильтр снизу, проходит через сукно и выходит из фильтра сверху. Перед стаканами расположен слой насадки *2* из колец Рашига, улавливающей более крупные частицы масла.

Техническая характеристика поршневых детандеров, применяемых в наиболее распространенных воздухоразделительных установках, приведена в табл. 6.1.

### 6.1.4. Обслуживание и ремонт поршневых детандеров

**Подготовка к пуску и пуск детандера.** Перед пуском детандера необходимо отжать тормозную колодку и провернуть маховик вручную на 1,5—2 оборота для того, чтобы установить, что ничто не мешает его движению. Предварительно следует убедиться в отсутствии сжатого воздуха в трубопроводе до и после детандера, так как в противном случае возможно неожиданное вращение вала детандера. Для такой проверки на трубопроводах воздуха высокого давления (в непосредственной близости к впускному клапану на головке детандера) установлены контрольно-продувочные вентили. Вращая маховик, проверяют четкость работы клапанов и правильность моментов их открытия и закрытия. Подготовку детандеров со смазкой цилиндра производят следующим образом: прокачивая вручную масляный насос высокого давления, подают в цилиндр 8—10 капель масла и открывают пробный масляный кран; появление в нем смазки показывает, что трубопровод заполнен маслом.

При наличии пневматического лубрикатора проверяют и регулируют поступление масла в цилиндр через контрольный глазок и подают в цилиндр 8—10 капель масла. Запорный вентиль на трубопроводе для впуска воздуха высокого давления в детандер должен быть плотно закрыт, а продувочный вентиль на участке трубопровода высокого давления между запорным вентилем и впускным клапаном — открыт.

Затем проверяют величину зазора между штоком впускного клапана и бойком коромысла, а также натяжение ремней передачи от маховика к шкиву электродвигателя детандера и открывают продувочные вентили детандерных фильтров.

После этого, вращая маховик детандера, ставят поршень в положение, соответствующее задней (нижней) мертвой точке, и включают электродвигатель детандера. Когда вал детандера начнет



вращаться, следует убедиться в том, что все механизмы детандера работают нормально и без стука, детали не перегреваются и всюду в достаточном количестве поступает смазка, а механизм распределения и клапаны работают правильно.

Затем закрывают продувочный вентиль на трубопроводе перед впускным клапаном и медленно открывают на один оборот запорный вентиль для подвода воздуха высокого давления в детандер. Вновь прослушивают работу детандера и, убедившись, что он работает нормально, полностью открывают запорный вентиль воздуха высокого давления; предварительно закрывают продувочные вентили детандерных фильтров.

Несколько детандеров, включенных параллельно, пускают один за другим после того, как ранее включенный детандер начинает работать нормально, в установленном для него режиме.

**Остановка детандера.** Для остановки детандера нужно закрыть запорный вентиль на трубопроводе воздуха высокого давления и открыть перед впускным клапаном продувочный вентиль; вентиль впуска воздуха высокого давления закрывают сначала не полностью; окончательно его надо закрыть позже быстрым поворотом маховичка вентиля, когда электродвигатель будет уже выключен. Затем выключают электродвигатель и быстро нажимают на рычаг тормоза для ускорения остановки машины, после чего закрывают вентиль на трубе, по которой воздух подается из детандера в воздухоразделительный аппарат.

При необходимости срочной остановки детандера следует быстро повернуть рукоятку ручного экстренного выключения и остановить электродвигатель, затем затормозить маховик колодочным тормозом, быстро закрыть вентиль воздуха высокого давления и открыть продувочный вентиль на линии впуска воздуха в детандер.

**Обслуживание детандера в работе.** Обслуживание детандера во время работы заключается в наблюдении за нормальной подачей смазки в цилиндр, работой масляного насоса для смазки механизма движения и за избыточным давлением масла (это давление должно быть равно 1—2 *кгс/см*$^2$). Необходимо также следить за работой клапанов и величиной сопротивления детандерных фильтров, состоянием сальников штоков клапанов (проверяют отсутствие пропуска воздуха через сальники).

Для обеспечения безопасной работы детандера следует перед каждой рабочей кампанией проверять пробным пуском исправность и правильное действие устройств, предупреждающих разнос машины.

Предохранительные клапаны и мембраны необходимо периодически очищать от льда (хорошие результаты дает постоянная обдувка их сухим азотом, который подводится по трубке диаметром 6—8 *мм*).

Для того чтобы мембраны не разрывались преждевременно под действием пульсирующего потока воздуха, перед ними устанавливают уравнители давления (демпферы). Последний представляет

собой трубу диаметром 75 *мм*, длиной 350 *мм*, в которую вставлены диафрагмы со втулками, имеющие отверстия и образующие лабиринт, свободное сечение которого должно быть рассчитано на пропуск всего воздуха при разрыве мембраны.

Температуру и давление воздуха перед детандером и после него контролируют 1—2 раза в час и результаты наблюдений заносят в журнал смены.

Детандер необходимо немедленно остановить при появлении в нем стуков, нагревании подшипников выше 60 °С, разрыве предохранительной мембраны или понижении давления масла в системе смазки.

**Возможные неполадки в работе детандера.** Повышение температуры воздуха, выходящего из детандера, указывает на пропуск клапанов; причиной негерметичности является отложение на них льда или износ клапана. В последнем случае клапан следует притереть. Иногда вследствие слишком обильной подачи масла оно попадает в холодную часть цилиндра и намерзает на выпускном клапане. В этом случае по клапану может ударить поршень, что приведет к его поломке.

Наружное обмерзание не только головки, но и стенок цилиндра детандера является признаком пропуска поршневых колец. В этом случае кольца необходимо заменить новыми и, если требуется, прошлифовать цилиндр. Новые кольца должны проработать вхолостую в течение 1—2 *ч* при снятых клапанах и обильной подаче масла; подачу масла постепенно доводят до нормальной.

Цилиндры чаще всего нагреваются вследствие неправильной пригонки поршневых колец. Нагревание после длительной работы машины является следствием недостаточной смазки или загрязнения масла. В этих случаях нужно при разборке детандера тщательно осмотреть поверхность поршневых колец и цилиндра. Если слишком мал зазор в замке кольца, его необходимо увеличить с тем, чтобы кольцо свободно вынималось из цилиндра. При обнаружении на поверхности цилиндра рисок его шлифуют.

Если при разборке цилиндра никаких дефектов не обнаружено, но после сборки он продолжает нагреваться, надо постепенно и понемногу увеличить подачу масла. В тех случаях, когда увеличение подачи масла не дает результатов, необходимо вынуть клапаны и, дав цилиндру обильную смазку, пустить детандер в работу на 2—3 *ч* для приработки колец, а затем, удалив из цилиндра лишнее масло, собрать клапаны и вновь пустить в ход детандер при нормальной подаче масла в цилиндр.

При заедании или негерметичности впускного клапана расход воздуха через детандер резко увеличивается , давление и температура воздуха после детандера повышаются и срабатывает предохранительный клапан детандерного фильтра. В этом случае следует немедленно остановить детандер, прекратив подачу воздуха высокого давления, и принять меры к устранению неисправности впускного клапана.



Негерметичность выпускного клапана вызывает утечку воздуха в момент его впуска и расширения. При этом расход воздуха возрастает, а его температура на выходе из детандера повышается. В данном случае следует остановить детандер и устранить негерметичность клапана.

При заедании выпускного клапана в открытом положении расход воздуха возрастает, давление после детандера увеличивается, снижается холодопроизводительность его, а температура воздуха после детандера значительно повышается. Машину нужно немедленно остановить, прекратив подачу в нее воздуха высокого давления, снять клапан, выявить и устранить причину заедания. Чаще всего это происходит вследствие попадания соринок в направляющие, искривления штока, слишком сильной затяжки сальника штока клапана.

При внезапном исчезновении напряжения в цепи электрогенератора детандера или при сильном ослаблении ременной передачи тормозящее действие электрогенератора исчезает или сильно ослабляется. Если в этом случае автоматическое устройство для остановки детандера не сработало, машину следует немедленно остановить вручную, быстро закрыв вентиль впуска воздуха высокого давления в детандер.

**Ремонт цилиндров.** Цилиндры поршневых детандеров изготовляются коваными из стали. Повреждение рабочей поверхности зеркала цилиндра и появление на ней рисок, задиров, трещин и прочих дефектов вызывают пропуски в поршневых кольцах, уменьшение холодопроизводительности детандера. При этом цилиндр детандера начинает обмерзать снаружи, в то время как при достаточном уплотнении поршня обмерзают только головка и корпус выпускного клапана детандера с пружиной.

Для устранения перечисленных дефектов внутреннюю поверхность цилиндра шлифуют или растачивают с последующей шлифовкой. Расточка необходима при наличии на рабочей поверхности по окружности цилиндра рисок глубиной более 0,5 *мм*, появлении овальности или конусности, превышающей 0,001 диаметра, и увеличении диаметра цилиндра более чем на 0,2 *мм*. Если при расточке рабочая площадь цилиндра увеличивается на 10%, в цилиндр запрессовывают стальную втулку, внутреннюю поверхность которой растачивают до требуемого размера и шлифуют.

Во время сборки детандера необходимо проверить величину линейного вредного пространства цилиндра, закладывая в него свинцовую проволоку, которая сплющивается в крайнем положении поршня. С увеличением вредного пространства понижается холодопроизводительность детандера. Линейное вредное пространство не должно превышать (в *мм*):

| | |
|---|---|
| в малых машинах (производительность до 250 $м^3/ч$) | 0,3—0,5 |
| в средних машинах (производительность 250—1000 $м^3/ч$) | До 1 |
| в крупных машинах (производительность 1000—3000 $м^3/ч$) | 1—1,5 |

При ремонте цилиндров детандеров, работающих без смазки и имеющих поршневые уплотнения из фторопласта, особое внимание должно быть обращено на точность и чистоту (▽8—▽10) обработки рабочей поверхности цилиндра, так как это имеет большое значение для срока службы поршневых уплотнений.

**Ремонт клапанов.** В результате испытываемых при работе ударов клапаны изнашиваются, начинают пропускать воздух, а иногда и ломаются. Негерметичность устраняют притиркой клапана к седлу. При каждой смене колец или манжет поршня детандера следует проверить герметичность клапанов.

Клапаны изготовляют из стали 12ХН3А или 1Х18Н9, головки клапанов из стали 12ХН3А и подвергают цементации, после окончательной обработки — закалке при 780—800 °С с охлаждением в воде и отпуску при температуре 180—200 °С. Клапаны из стали 1Х18Н9 подвергают только поверхностному азотированию. Следующей стадией обработки клапана является шлифовка. Притирку цилиндрической части клапана производят на токарном станке с помощью бархатной шкурки, прижимаемой к клапану деревянными зажимами с кожаными прокладками. Седло клапана притирают пастой ГОИ или тонко измельченным стеклом, замешанным на веретенном масле, после чего клапан и седло тщательно промывают от остатков пасты и масла. Клапаны из нержавеющей стали 1Х18Н9 имеют направляющую втулку из фосфористой бронзы.

Плотность впускного клапана проверяют следующим образом. Поршень детандера ставят в положение, соответствующее задней мертвой точке и тормозом зажимают маховик. Затем отвинчивают крышку предохранительной мембраны на выпускном клапане, при закрытом впускном клапане отжимают шпиндель выпускного клапана и открывают вентиль впуска воздуха высокого давления. Пропуск впускного клапана обнаруживается по выходу воздуха из отверстия мембраны.

Так же проверяют плотность выпускного клапана, причем впускной клапан должен быть открыт, а выпускной закрыт. Затем проверяют правильность установки моментов открытия и закрытия клапанов детандера. Для этого на торце вала или на маховике детандера устанавливают круг с делениями (лимб), облегчающий правильную установку моментов распределения и регулирование клапанов.

Уплотнительные кольца сальниковой набивки впускного клапана изготовляют из фторопласта или обезжиренной кожи. В импортных детандерах двойного действия, имеющих шток с сальником, сальниковые набивки изготовляют из свинцово-графитовых колец. Для этого на станке нарезают свинцовую стружку сечением 0,2×1 *мм*, длиной 100—200 *мм*, слоями укладывают ее в прессформу, пересыпая чешуйчатым графитом, и спрессовывают. Готовое кольцо требуемых диаметра и высоты разрезают под углом 45° таким образом, чтобы плоскости срезов были перпендикулярны плоскости оси клапана. Кольца изготовляют также из смеси, содержащей 60% свинцового порошка и 40% чешуйчатого графита. В качестве связующего служит шнуровой асбест, две-три пряди которого (диаметром 2—3 *мм*) закладывают в прессформу.



Сальниковая набивка для штоков выпускных клапанов должна быть мягкой, обеспечивать герметичность при незначительной затяжке сальниковой гайки и легкое (вручную) перемещение штока в сальнике. Сальниковую набивку изготовляют из фторопласта с наполнителями, пропрафиченного асбеста, свинцово-графитовых колец или обезжиренной кожи.

Пружины для теплых клапанов изготовляют из стали 60С2А или 50ХФА холодной навивкой.

После навивки пружины подвергают термической обработке по следующему режиму (для стали 50ХФА): нормализация при 720—730 °С в течение 15—20 *мин* с охлаждением на воздухе; закалка в масле при 850—860 °С и отпуск в соляной ванне при 400—420 °С с выдержкой 30—38 *мин* или в свинцовой ванне с выдержкой 25—30 *мин*. Твердость пружины после термообработки должна быть HRC 40—48. Затем пружины подвергают дробеструйной обработке и шлифовке торцов, после чего сжатием проверяют соответствие характеристики пружины заданной в чертеже.

Пружины для холодных клапанов изготовляют из бронзы Б2. Сила действия пружины должна быть достаточной для преодоления трения в сальнике штока клапана.

При сборке клапанов необходимо тщательно контрить гайки клапанных бойков, чтобы во время работы не произошло изменения зазора между бойком и толкателем, так как это нарушит правильную работу детандера.

**Ремонт кулачков.** При сильном износе кулачки следует заменить новыми. Кулачки изготовляют из углеродистой стали Ст. 45. Наружный профиль кулачка обрабатывают на фрезерном станке с точностью до 0,05 *мм*. После этого кулачок шлифуют или опиливают вручную, проверяют при помощи угольника и специально изготавливаемого шаблона, а затем зачищают мелкой шкуркой. Готовый кулачок подвергают цементации или закалке с последующим отпуском до требуемой твердости. Во время нагрева кулачка следят, чтобы на нем не образовался слой окалины. После термической обработки кулачок окончательно зачищают мелкой шкуркой.

**Смена и изготовление манжет.** Манжеты для уплотнения поршней некоторых типов импортных детандеров низкого и среднего давления изготовляют из хромового чепрака толщиной 4,25—4,5 *мм*, с влажностью не более 16%. Кожа для манжет должна иметь гладкую лицевую поверхность. Предварительно кожу обезжиривают при обычной температуре, промывая ее в течение 24 *ч* в десятикратном (к массе кожи) количестве четыреххлористого углерода; растворитель дважды меняют, после чего кожу сушат на воздухе.

Обезжиренную кожу пропитывают расплавленным парафином при 75 °С или церезином (искусственным воском) при 95 °С, погружая ее на 3 *мин* в эти вещества. При этом масса кожи увеличивается на 30% за счет поглощения ею пропитывающего вещества. После пропитки поверхность кожи очищают от остатков парафина или церезина, а затем штампуют манжету в горячем состоянии при 80—85 °С с охлаждением в штампе до комнатной температуры. При штамповке лицевая часть кожи обращена наружу. Диаметр манжеты должен быть на 2—3 *мм* больше внутреннего диаметра цилиндра; на рабочей поверхности манжеты не допускаются складки и повреждения. Готовые манжеты, собранные на деревянных болванках, хранят в прохладном месте, в закрытом цилиндрическом футляре из жести или латуни. Таким же способом обрабатывают кожу для уплотнения сальников штоков клапанов детандера.

При установке в поршень манжету нельзя сильно затягивать во избежание слишком плотного прилегания к цилиндру и быстрого износа. Манжета должна быть равномерно прижата ко всей внутренней поверхности стенки цилиндра. Необходимо следить за тем, чтобы между манжетой и цилиндром не попадали твердые частицы( металла, песка и пр.), так как это приведет к порче цилиндра и манжеты. Состояние манжет детандера проверяют при каждой остановке аппарата на отогрев.

**Смена поршневых колец** проводится таким же способом, как и в компрессоре.

**Сборка и испытание детандера.** Зазор между башмаком и параллелью должен быть от 0,08 до 0,12 *мм*, а осевой зазор между валом и подшипником шатуна — не более 0,1—0,2 *мм*. Начало выпуска газа устанавливают таким образом, чтобы при закрытом клапане зазоры между толкателями и бойками составляли 0,3—0,5 *мм*. Начало впуска определяют из условия, чтобы первоначальный зазор между гайкой клапана и бойком толкателя в нулевом положении ролика после затяжки пружины клапана равнялся 0,3 *мм*. При установке моментов начала открытия и закрытия клапанов следует обратить внимание на то, чтобы впускной и выпускной клапаны не были одновременно открыты.

Допустимая величина биения обода маховика в осевом и радиальном направлениях — не более 1 *мм*. Центробежный выключатель проверяют и регулируют на срабатывание при максимальном числе оборотов, установленном для данного детандера. Все смазочные каналы и трубки после сборки продувают сжатым воздухом.

После ремонта и сборки детандер без клапанов обкатывают 4 *ч* (непрерывно) от электродвигателя при обильной смазке цилиндра. После этого осматривают цилиндр, поршневые кольца, механизм движения и заменяют масло. Затем испытывают детандер при непрерывной работе в течение 20 *ч*; из них 10 *ч* в режиме пуска и 10 *ч* в рабочем режиме установки. После осмотра клапанов, цилиндра, поршневых колец, шатунного подшипника, смазывающих устройств и привода клапанов, если никаких дефектов не обнаружено, детандер может быть пущен в эксплуатацию. Во время обкатки и технологических испытаний не должно быть стуков, нагревания движущихся частей выше 70 °С и других неполадок. В случае обнаружения неисправностей детандер останавливают для устранения неполадок.



## 6.2. ТУРБОДЕТАНДЕРЫ

Турбодетандеры применяются в воздухоразделительных установках для получения необходимого количества холода путем расширения сжатого воздуха с отдачей внешней работы.

Основные преимущества турбодетандеров перед поршневыми детандерами следующие:

1) отсутствие трущихся элементов и необходимости смазки в холодных частях машины;

2) возможность полного расширения газа в рабочем колесе до заданного противодавления с использованием всего перепада давлений и температур для получения заданной холодопроизводительности;

3) отсутствие клапанов;

4) возможность работы при низких температурах и давлениях на входе и выходе рабочего газа;

5) непрерывное действие, высокая скорость прохождения газа и компактность агрегата;

6) малые удельные холодопотери в окружающую среду.

Турбодетандеры воздухоразделительных установок работают, как правило, на низком избыточном давлении впуска (4,8—5,5 *кгс/см*$^2$) и избыточном противодавлении 0,3—0,4 *кгс/см*$^2$. Температура газа составляет на входе от минус 158 до минус 135 °С, на выходе — минус 175 — минус 180 °С, что уже близко к точке конденсации воздуха. Эти условия соответствуют теплоперепаду 6—10 *ккал* (25—42 *кдж*) на 1 *кг* расширяемого воздуха.

Иногда применяют турбодетандеры с другими параметрами газа на входе и выходе, работающие при теплоперепаде от 3 до 20 *ккал/кг* (12—84 *кдж/кг*). Используются турбодетандеры также и в установках с циклами среднего давления при перепаде давления от 25 до 5 *кгс/см*$^2$. Пропускная способность существующих турбодетандеров составляет от 400 до 60 000 *м*$^3$*/ч*, а применяемых в типовых промышленных установках — от 2800 до 24 000 *м*$^3$*/ч*.

В установках для ожижения гелия применяются турбодетандеры небольшого размера, с ротором диаметром около 90—100 *мм* и скоростью вращения от 18 000 до 265 000 *об/мин*. Валы таких турбодетандеров имеют подшипники с газовой смазкой и уплотнения лабиринтного типа. Давление газа на входе 8—14 *кгс/см*$^2$. В качестве тормозного устройства используется турбогазодувка, посаженная на вал ротора турбодетандера.

В зависимости от начального рабочего давления все турбодетандеры можно условно разделить на три следующие группы:

| | Низкого давления | Среднего давления | Высокого давления |
|---|---|---|---|
| Начальное давление | | | |
| *кгс/см²* | 5—15 | 30—60 | 60—200 |
| *Мн/м²* | 0,5—0,15 | 3—6 | 6—20 |
| Конечное давление | | | |
| *кгс/см²* | 1,2—1,5 | 6 | 6 |
| *Мн/м²* | 0,12—0,15 | 0,6 | 0,6 |
| Начальная температура, °К | 116—120 | 150—170 | 260—280 |
| Степень расширения | 0,1—0,25 | 0,1—0,2 | 0,03—0,1 |

Турбодетандеры высокого давления бывают одно- и двухступенчатыми, низкого и среднего давлений — одноступенчатыми. В воздухоразделительных установках находят применение одноступенчатые центростремительные турбодетандеры низкого давления, активные и активно-реактивные. Первые турбодетандеры активного типа начали применяться с 1932 г. С тех пор конструкции их значительно изменились и стали весьма разнообразными.

### 6.2.1. Активные турбодетандеры

Схема рабочего колеса активного турбодетандера приведена на рис. 6.20. Сжатый воздух поступает под давлением в сопла *1* неподвижного направляющего аппарата *2* и расширяется в них до давления $p_2$. Выходя из сопел с большой скоростью, струя воздуха поступает на лопатки *3* рабочего колеса турбодетандера и вращает его в направлении, указанном стрелкой. Конец вала соединен с электрогенератором, который

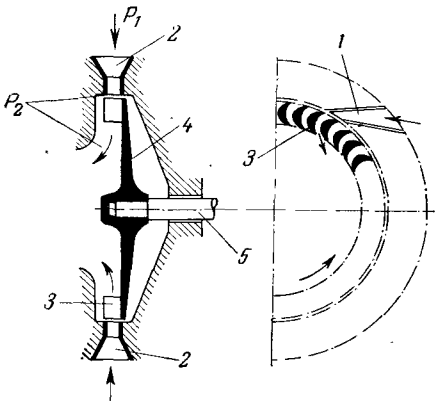



Рис. 6.20. Схема рабочего колеса активного турбодетандера:
*1* — сопло; *2* — направляющий аппарат; *3* — лопатки рабочего колеса; *4* — диск рабочего колеса; *5* — вал.

превращает механическую энергию вращения рабочего колеса в электрическую. В качестве генератора используется асинхронный электродвигатель переменного тока, работающий в режиме генератора.

В турбодетандере активного типа газ полностью расширяется в направляющих соплах. При этом он приобретает максимальную скорость* и вся энергия расширившегося газа передается рабочему колесу в результате воздействия скоростного напора воздуха на

* В соплах активного турбодетандера эта скорость равна 180—200 *м/сек*.



лопатки колеса. Таким образом, в турбодетандерах активного типа требуются очень высокие скорости истечения газа из сопел. Вследствие этого потеря энергии на трение рабочего колеса о воздух, на преодоление центробежных сил и на удар при входе струи в лопатки рабочего колеса достигает значительной величины и составляет 30—50% общего количества энергии сжатого воздуха. Поэтому адиабатический к. п. д. активных турбодетандеров обычно не превышает 0,5—0,7 в зависимости от режима их работы.

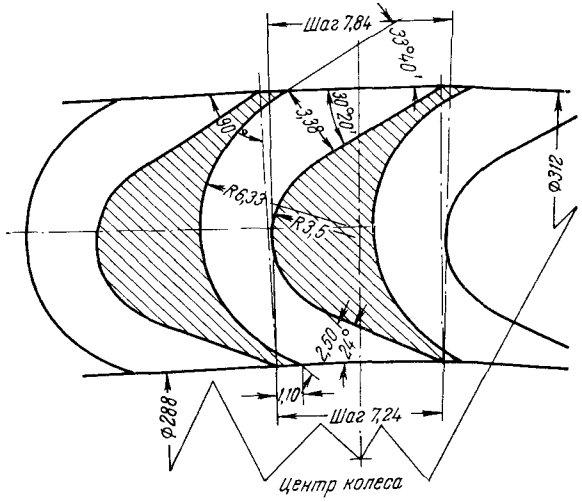



Рис. 6.21. Профиль лопаток рабочего колеса активного турбодетандера установки КТ-3600.

Конструктивно турбодетандеры активного типа выполняются в виде одноколесных (одноступенчатых) радиальных турбин с парциальным регулированием подачи воздуха в направляющий аппарат. Парциальным регулированием называется *способ изменения количества подводимого в турбодетандер воздуха путем включения и выключения некоторого количества воздухоподводящих сопел направляющего аппарата.*

Отношение длины окружности, на которой расположены работающие сопла, к длине всей окружности сопел называется *степенью парциальности.*

Пропускная способность активного турбодетандера определяется суммарным сечением горловин сопел направляющего аппарата, включенных в работу.

Поскольку в активном турбодетандере на лопатках рабочего колеса не происходит расширения газа, они имеют небольшую длину, и поэтому отношение внутреннего диаметра колеса к наружному составляет 0,85—0,92.

Профиль лопаток рабочего колеса активного турбодетандера установки КТ-3600 показан на рис. 6.21.

При пуске турбодетандер развивает на валу мощность 55 *квт*. Мощность электродвигателя (генератора) трехфазного тока напряжением 220/380 *в* равна 55 *квт*, число оборотов в минуту 3000. Вес турбодетандерного агрегата составляет 1680 *кгс*.

### 6.2.2. Активно-реактивные турбодетандеры

Схема рабочего колеса активно-реактивного турбодетандера приведена на рис. 6.22. Сжатый газ под давлением $p_1$ поступает в каналы неподвижного направляющего аппарата *1*, где расширяется до некоторого промежуточного давления $p_2$. Выходя из направляющего аппарата с большой скоростью, струя газа поступает на лопатки *2* рабочего колеса и вращает его вместе с валом *3*.

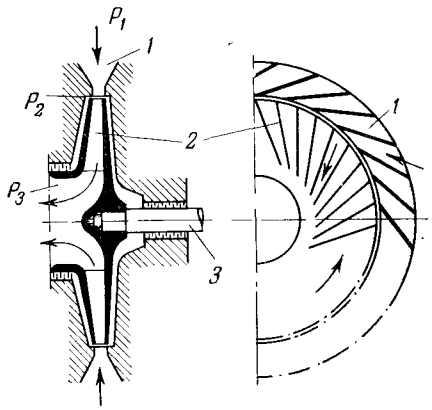



Рис. 6.22. Схема рабочего колеса активно-реактивного турбодетандера:
*1* — направляющий аппарат; *2* — лопатки рабочего колеса; *3* — вал.

Лопатки колеса активно-реактивного турбодетандера образуют длинные изогнутые каналы, идущие от окружности колеса и расширяющиеся к центру. Вследствие этого газ, проходящий по каналам рабочего колеса, расширяется в них до конечного давления $p_3$, производя при этом дополнительную работу, которая передается колесу давлением движущегося газа на лопатки рабочего колеса (реакция газа).

В активно-реактивных турбодетандерах обычно только часть энергии сжатого газа передается колесу в форме скоростного напора. Остальная часть энергии используется в виде реакции струй газа, расширяющихся в рабочем колесе.

Как известно, запас энергии газа определяется адиабатическим теплоперепадом между состоянием газа на входе в турбодетандер и выходе из него. В активно-реактивном турбодетандере этот перепад распределяется между направляющим аппаратом и рабочим колесом. Отношение адиабатического теплоперепада, используемого в рабочем колесе, к общему располагаемому адиабатическому теплоперепаду турбодетандера называется *степенью реактивности*.

Следовательно, если располагаемый теплоперепад распределяется поровну между направляющим аппаратом и рабочим колесом, то степень реактивности равна 0,5. Чем больше часть теплоперепада, используемая в рабочем колесе, тем выше степень реактивности. Потери энергии в радиальном активно-реактивном турбодетандере зависят от степени реактивности и будут наименьшими при степени реактивности 0,4—0,5.



Для получения достаточно длинных лопаток отношение внутреннего диаметра рабочего колеса к его наружному диаметру должно составлять 0,3—0,4.

Расход воздуха $G$ (в *кг/сек*) в реактивном турбодетандере определяют по формуле

$$G = F \cdot c_1 \cdot \rho_1 = F \cdot 91{,}5\varphi \cdot \rho_1 \sqrt{1 - \zeta \cdot h_t} \qquad (6.6)$$

где $F$ — площадь проходного сечения направляющего аппарата, *м*²;
$c_1$ — действительная скорость истечения газа из направляющего аппарата, *м/сек*;
$\rho_1$ — плотность газа в зазоре между колесом и направляющим аппаратом, *кг/м*³;
$\varphi$ — скоростной коэффициент при истечении струи газа из направляющего аппарата; принимается $\varphi = 0{,}92—0{,}96$;
$\zeta$ — степень реактивности;
$h_t$ — располагаемый адиабатический теплоперепад, *ккал/кг*.

В активно-реактивном турбодетандере скорость газа в направляющем аппарате, скорости на входе и выходе газа из рабочего колеса, а также относительная скорость входа газа на лопатки колеса получаются меньшими, чем в активном турбодетандере. Кроме того, поток газа в реактивном рабочем колесе с длинными лопатками движется более плавно, без резких изменений направления потока. Все это существенно снижает потери энергии газа на удар и завихрения при входе в рабочее колесо, на трение в каналах, потери на выходе из рабочего колеса.

Поскольку колесо активно-реактивного турбодетандера имеет диаметр на выходе значительно меньший, чем на входе газа, можно на выходе применять лабиринтное уплотнение между рабочим колесом и корпусом турбодетандера со снижением до минимума утечек газа, которые в активном турбодетандере достигают заметной величины.

В силу указанных особенностей активно-реактивные турбодетандеры имеют более высокий к. п. д. (0,75—0,85), чем турбодетандеры активного типа при одинаковых начальных условиях (давлении и температуре*). Это обстоятельство имеет важное значение для воздухоразделительных установок, работающих с использованием воздуха только низкого давления, так как в них турбодетандер является основной холодопроизводящей машиной. Поэтому в таких установках обычно применяются турбодетандеры активно-реактивного типа.

Конструкция турбодетандера активно-реактивного типа разработана академиком П. Л. Капица и впервые в мировой практике применена в СССР для воздухоразделительных установок низкого давления в 1939 г. В дальнейшем такие турбодетандеры начали применять и за рубежом.

---

* Применение парциального регулирования в активно-реактивных турбодетандерах может снижать их к.п.д.

В последующие годы ВНИИкриогенмаш были разработан активно-реактивные турбодетандеры различной производительно сти, которыми комплектуются воздухоразделительные установки Турбодетандерный агрегат ТДР-19-6 для воздухоразделительны установок БР-1, БР-1М, БР-1К, БР-1А и др. показан на рис. 6.2 и 6.24. Турбодетандер ТДР-19-6 рассчитан на расход до 24 000 *м³/* воздуха и работает при температуре на входе —156 °С; перепа давления с 4,8 до 0,4 *кгс/см²*, скорость вращения вала 6900 *об/мин* Адиабатический к. п. д. равен 0,8—0,82.

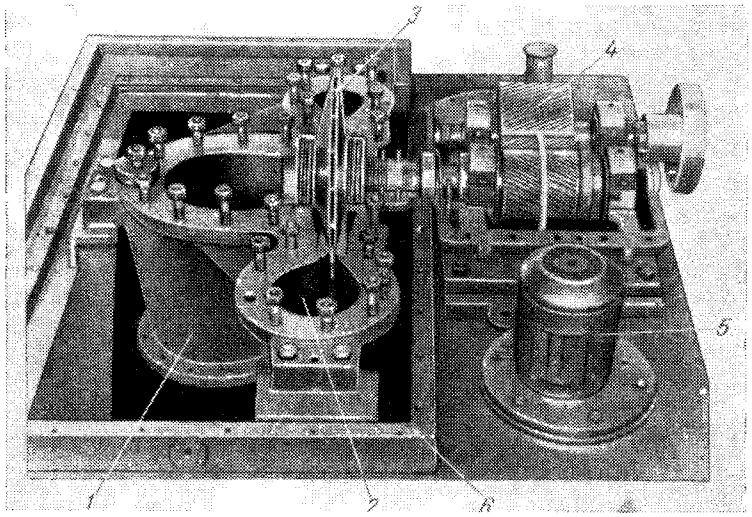



Рис. 6.23. Турбодетандер ТДР-19-6 с рабочим колесом и редуктором (крышки турбодетандера и редуктора сняты):

*1* — патрубок для выхода воздуха; *2* — спиральный канал (улитка) для входа воздуха; *3* — рабочее колесо; *4* — шестерни редуктора; *5* — электродвигатель пускового маслонасоса; *6* — кожух.

Рабочее колесо изготавливается из алюминиевого сплава АК снабжается цельнофрезерованными лопатками и имеет односто ронний выход газа; оно посажено консольно на вал быстроходно шестерни редуктора. Колесо разгружено от осевых усилий, а слу чайные осевые нагрузки воспринимаются упорным подшипником редуктора.

Корпус турбодетандера разъемный по оси, выполняется литы из латуни ЛК-80-3 и опирается на раму тремя лапами, одна и которых может перемещаться по шпонке. Диск и лопатки направ ляющего аппарата сделаны из латуни ЛЖМц-59-1-1. Подвод воз духа спиральный, причем патрубки направлены вниз, что обеспечи вает удобство осмотра и выверки при монтаже и ревизии.



Мощность, развиваемая турбодетандером, используется для привода короткозамкнутого асинхронного электродвигателя, рабо тающего в режиме генератора, с отдачей энергии в сеть; электро двигатель смонтирован на самостоятельной раме.

Редуктор турбодетандера выполнен в виде одноступенчатой ко озубой передачи; класс точности нарезки зубьев высокий. Смазка зацепления и подшипников — принудительная циркуляционная от

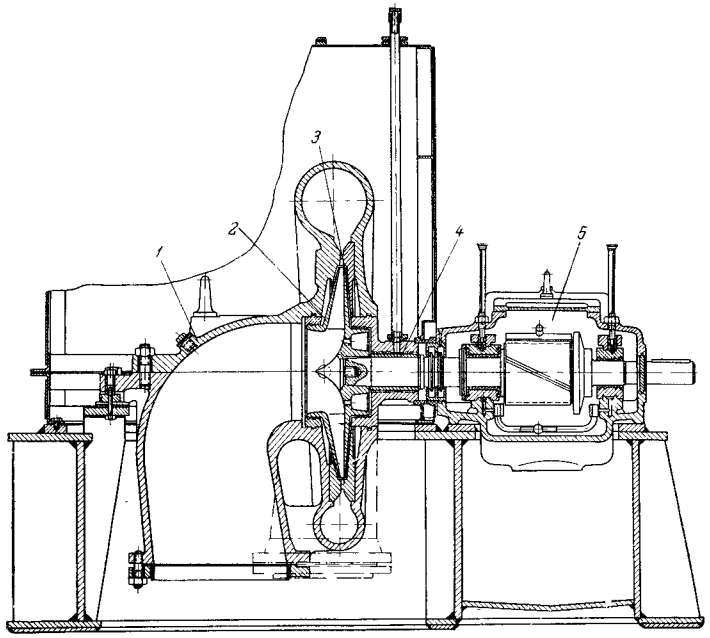



Рис. 6.24. Турбодетандер ТДР-19-6 (разрез) для установок БР-1, БР-1М и др.:

*1* — корпус; *2* — рабочее колесо; *3* — направляющий аппарат; *4* — лабиринтное уплотнение вала; *5* — редуктор.

шестеренчатого насоса, встроенного в редуктор. Возникающее в за цеплении осевое усилие воспринимается упорной шайбой, посажен ной на вал быстроходной шестерни. При пуске и остановке агрега та смазка подается отдельным (пусковым) шестеренчатым электро насосом.

Турбодетандерные агрегаты снабжаются устройством для защи ты от разгона в случае внезапного исчезновения напряжения в лю бой из фаз сети при перегрузке и коротком замыкании. Защита осуществляется прекращением подачи воздуха в турбину с по мощью быстродействующего запорного клапана, работающего с воздушным сервомотором.

### 6.2.3. Регулирование холодопроизводительности турбодетандеров

В установках низкого давления холодопроизводительность дро селирования воздуха невелика и не превышает 5—6% общей хо лодопроизводительности цикла. Поэтому в таких установках тур бодетандер является основным источником «холода». Вследстви этого изменение удельных холодопотерь в течение года эксплуата ции блока разделения вызывает необходимость регулировани холодопроизводительности турбодетандера.

Действительно, летом температура охлаждающей воды повы шается, что ведет к повышению температуры воздуха перед ре генераторами, а это, в свою очередь, увеличивает холодопотери о недорекуперации в регенераторах и теплообменниках.

Кроме того, холодопотери от недорекуперации могут увелич ваться при нарушении режима работы регенераторов (наприме вследствие неправильного распределения воздуха между кисл родными и азотными регенераторами, ухудшения теплообмена пр загрязнении насадки маслом или забивки ее двуокисью углерод прохождения воздуха частично мимо насадки, по зазору межд галетами и стенкой регенератора, и пр.).

Холодопотери через изоляцию изменяются в зависимости о наружной температуры, а также могут увеличиваться вследстви оседания изоляции и насыщения ее влагой наружного воздух холодопотери возрастают также при периодических отогрева отдельных аппаратов блока, включении блоков криптона и техни ческого кислорода и по другим причинам. Необходимая для работ блока разделения воздуха холодопроизводительность резко ув личивается в пусковой период.

Изучение условий использования турбодетандеров в действу щих установках* показало, что пределы изменения потребной хол допроизводительности составляют от 50 до 100% расчетной велич ны, а по отношению к среднегодовой холодопроизводительнос равны ±25—35%.

В установках низкого давления применяются следующие сп собы регулирования холодопроизводительности цикла при испол зовании активно-реактивных турбодетандеров.

1. Применение двух турбодетандеров одинаковой или разно холодопроизводительности. Обе машины работают в пусковой пе риод, а при рабочем режиме включается тот турбодетандер, хол допроизводительность которого наиболее соответствует потребл нию холода в данный период. Однако при этом нарушается при цип взаимозаменяемости турбодетандеров.

---

* См. Давыдов А. Б., Епифанова В. И., Труды ВНИИкима вып. 5, 1962.



2. Уменьшение холодопроизводительности турбодетандера путем дросселирования воздуха перед поступлением в машину. При этом холодопроизводительность понижается из-за сокращения подачи воздуха и в результате уменьшения используемого теплоперепада. Способ дросселирования наименее экономичен, так как заметно снижает к. п. д. турбодетандера.

Адиабатический к. п. д. турбодетандера зависит от соотношения между используемым и располагаемым адиабатическими теплоперепадами (отсчитанными при постоянной энтропии). В установках низкого давления располагаемый теплоперепад определяется разностью давлений в нижней и верхней колонне (за вычетом потерь давления в коммуникациях). Как видно из рис. 6.25, к. п. д. резко понижается при уменьшении используемого теплоперепада по сравнению с расчетным, что характерно для принудительного дросселирования воздуха перед турбодетандером с целью уменьшения его холодопроизводительности. Влияние дросселирования на понижение к. п. д. можно уменьшить, если так рассчитать турбодетандер, чтобы наивысший к. п. д. достигался при нагрузке, равной 75% от максимальной; тогда при дросселировании до этих пределов нагрузки к. п. д. турбодетандера почти не снижается.

3. Регулирование расхода воздуха через турбодетандер. Для этого применяются следующие способы:

1) изменение числа работающих сопел направляющего аппарата; этот способ используется в турбодетандерах ТДР-50-5 и ТДР-42-5 установки БР-2 и достаточно экономичен, так как адиабатический к. п. д. турбодетандера уменьшается незначительно (рис. 6.26);

2) регулирование проходного сечения сопел направляющего аппарата путем изменения угла наклона лопаток при их повороте; этот способ наиболее экономичен, так как адиабатический к. п. д. турбодетандера почти не снижается; используется в новейших конструкциях турбодетандеров;

3) изменение ширины щели направляющего аппарата; существуют два метода изменения ширины щели:

а) использование в турбодетандерах сменных направляющих аппаратов с различной шириной щели, что принято в турбодетандерах ТДР-15 (для установок БР-5 )и ТДР-19-6 (для установок БР-1, БР-1М и других модификаций установки БР-1). Сменные направляющие аппараты имеют следующую характеристику*:

| | ТДР-15 | | ТДР-19-6 | |
|---|---|---|---|---|
| | № 1 | № 2 | № 1 | № 2 |
| Ширина щели, *мм* | 7,6 | 8,4 | 8,6 | 10,2 |
| Расход воздуха, *кг/ч* | 9 700 | 11 000 | 20 000 | 24 000 |
| Холодопроизводительность, *ккал/ч*, около | 68 000 | 77 000 | 142 000 | 170 000 |

---

* № 1 — для зимних, № 2 — для летних условий работы.

б) изменение ширины щели при перемещении в осевом направлении подвижной щеки направляющего аппарата с помощью специального механизма; этот метод целесообразен в турбодетандерах с шириной щели более 8—10 *мм*.

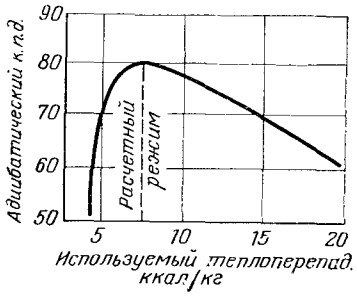



Рис. 6.25. Зависимость адиабатического к.п.д. активно-реактивного турбодетандера от используемого теплоперепада.

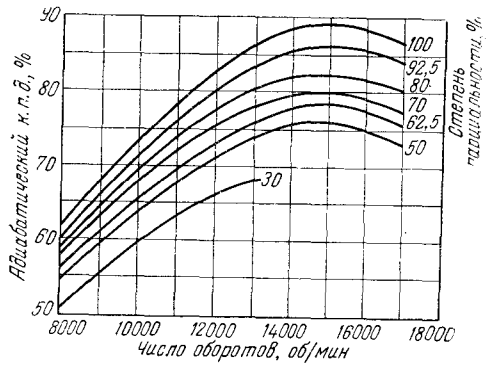



Рис. 6.26. Зависимость адиабатического к.п.д. активно-реактивного турбодетандера от числа оборотов и степени парциальности (отношения дуги, занятой работающими соплами, к длине окружности, на которой размещены сопла). Опытные данные для работы турбодетандера: расход воздуха в стандартных условиях 3300 $м^3/ч$, абсолютное давление $p_1 = 4,7$ $кгс/см^2$, $p_2 = 1,2$ $кгс/см^2$, $t_1 = -145$ °С (ВНИИкриогенмаш).

Характеристики турбодетандеров воздухоразделительных установок приведены в табл. 6.2.

## 6.3. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТУРБОДЕТАНДЕРОВ

**Подготовка к пуску турбодетандера.** Перед первым впуском воздуха в турбодетандер необходимо тщательно продуть подводящие трубопроводы. Это делается для того, чтобы предотвратить попадание кусочков припоя, окалины и т. п. на лопатки колеса турбины. Продувкой удаляется также влага и твердая двуокись углерода, которые, попав в детандер и намерзнув на его лопатках, могут вызвать вибрацию колеса.

Затем проверяют наличие масла в корпусе редуктора турбодетандера, для чего открывают вентиль пускового масляного насоса и прокачивают масло до тех пор, пока манометр на маслопроводе не укажет повышения давления. Если уровень масла при этом опустится ниже красной черты маслоуказателя, доливают масло в резервуар.



**Таблица 6.2. Характеристика турбодетандеров воздухоразделительных установок**

| Турбодетандеры | Установки | Расход газа, $кг/ч$ | Температура на входе, °К | Температура на входе, °С | Абсолютное давление, $кгс/см^2$: на входе | Абсолютное давление, $кгс/см^2$: на выходе | Располагаемый адиабатический теплоперепад, $ккал/кг$ | Наружный диаметр колеса, *мм* | Число оборотов колеса в 1 *мин* | Ширина щели направляющего аппарата, *мм* | Электродвигатель (генератор): мощность, *квт* | Электродвигатель (генератор): напряжение, *в* | Электродвигатель (генератор): число оборотов в 1 *мин* | Вес агрегата, *т* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| КТ-3600 | КТ-3600; КТ-3600Ар | 2 800—9 000 | 138 | —135 | 5,5 | 1,2 | 12,4 | 312 | 7 200 | 6,6 | 55 | 220/380 | 3 000 | 1,68 |
| ТД-3100-6/1 | Бр-4А | 1 300—4 000 | 118 | —155 | 6,0 | 1,37 | 8,8 | 140 | 15 500 | 6 | 30 | 220/380 | 3 000 | 1,25 |
| ТДР-14А | БР-1 | 19 500 | 117 | —156 | 5,8 | 1,4 | 8,85 | 500 | 6 900 | 8,6 | 250 | 220/380 | 3 000 | 3,95 |
| ТДР-15 | БР-5 | 9 600 | 118 | —155 | 5,7 | 1,4 | 8,87 | 290 | 11 860 | 7,6 | 100 | 220/380 | 3 000 | 2,40 |
| ТДР-16 | — | 4 000 | 126 | —147 | 7,5 | 1,4 | — | — | 17 400 | — | 40 | — | 3 000 | 1,5 |
| ТДР-19 | БР-6; БР-9 | 15 000 | 125 | —148 | 5,8 | 1,4 | 9,25 | 440 | 6 900 | 8,7 | 160 | 220/830 | 3 000 | 3,60 |
| РТ-17-6* | БР-6; БР-9 | 10 000—17 000 | 125 | —148 | 5,85 | 1,5 | 9,2 | 240 | 14 900 | 8,5 | 160 | 220/380 | 3 000 | 3,22 |
| ТДР-19-6 | БР-1; БР-1М; БР-1А; БР-1К; БР-1КАр; БР-1Кч | 24 000 | 117 | —156 | 5,8 | 1,4 | 8,9 | 500 | 6 900 | 10,2 | 250 | 220/380 | 3 000 | 3,95 |
| ТДР-42-6** | БР-2 | 40 000—50 000 | 115 | —158 | 5,2 | 1,3 | 8,6 | 600 | 5 670 | 18,7 | 630 | 6000 | 2 975 | 10,50 |
| ТДР-3-6Б | БР-14 | 2 000—4 000 | 130 | —143 | 6,0 | 1,4 | 10,0 | 136 | 27 100 | 3,9 | 40 | 220/380 | 3 000 | 1,17 |
| ТДР-0,68М | — | 800 | 123 | —150 | 8 | 2 | — | — | 60 000 | — | Масляный тормоз | | | 0,225 |

* Регулирование производится поворотом лопаток направляющего аппарата; заменяет ТДР-19.
** Регулирование осуществляется отключением сопел.

Проверяют действие предохранительной заслонки (шибера) которая отключает подачу воздуха в турбодетандер при внезапном прекращении подачи тока к электрогенератору. Заслонка должна автоматически закрываться при выключении рубильника на линии подвода тока к электрогенератору.

Если детандер имеет демпфер*, проверяют наличие в масленке демпферной жидкости, заполнив ею демпфер до установленного уровня. При этом жидкость должна заполнять все каналы, зазоры и маслопроводы демпферного пространства. В некоторых детандерах для обогрева подшипников применяется вода, поступление которой в водяные камеры регулируется.

**Пуск турбодетандера.** После включения масляного насоса полностью открывают вентиль на трубе, отводящей газ из турбодетандера; затем включают электродвигатель и, когда вал турбодетандера получит нормальное число оборотов, начинают медленно открывать вентиль на трубе для впуска газа в турбодетандер, постепенно нагружая его. При этом следят за давлением воздуха перед направляющим аппаратом турбодетандера и показаниями амперметра, которые не должны превышать величин, установленных регламентом.

Впуск холодного воздуха в теплый турбодетандер производят постепенно, не допуская слишком резкого охлаждения рабочих частей во избежание появления в них опасных деформаций.

Перед пуском турбодетандерного агрегата необходимо в течение 2—3 *мин* прокачивать масло пусковым насосом. Избыточное давление масла должно составлять: до масляного фильтра 3 *кгс/см*², после него — не ниже 0,5 *кгс/см*². Подачу масла пусковым насосом следует производить также во время включения электродвигателя турбодетандерного агрегата, прекратив ее тогда, когда шестеренчатый масляный насос начнет нормально подавать масло в систему смазки при работе турбодетандера. Подачу воды в масляный холодильник включают в тот момент, когда температура масла достигает 30 °С.

**Обслуживание турбодетандера.** В процессе работы необходимо наблюдать за давлением, уровнем и температурой масла. Температура подшипников не должна превышать 60 °С.

Фильтр-холодильник в случае загрязнения, о чем свидетельствует увеличение его сопротивления больше 0,6 *кгс/см*², можно отключать и прочищать, не останавливая турбодетандер. При понижении уровня масла ниже красной черты необходимо найти причину утечки масла и устранить ее. В некоторых случаях утечка масла происходит вследствие негерметичности масляного холодильника. Необходимо следить за непрерывной подачей воды в масляный холодильник; в случае прекращения подачи следует остановить турбодетандер.

* Демпфером называется *приспособление, предназначенное для поглощения механических колебаний* (в данном случае — колебаний вала детандера).



Таблица 6.3 **Возможные неполадки в работе турбодетандерных агрегатов**

| Неполадки | Причины возникновения | Способы устранения |
|---|---|---|
| 1. Значительная вибрация турбодетандерного агрегата | | Остановить агрегат, а затем: |
| | а) Расцентровка редуктора с двигателем | а) Проверить центровку и устранить дефекты |
| | б) Дебаланс колеса турбины | б) Проверить и устранить дебаланс |
| | в) Выпадение льда и твердой двуокиси углерода в полости турбины при заносе их воздухом или вследствие работы при ненормальных параметрах | в) Отогреть турбину и запустить при режиме, исключающем возможность выпадения льда или твердой двуокиси углерода, выявить и устранить причины заноса твердых частиц с поступающим воздухом |
| | г) Выработка подшипников | г) пришабровкой вкладышей восстановить нормальные зазоры, тщательно очистить и промыть систему маслоподачи, сменить масло; |
| | д) Разработка и неисправность подшипников генератора | д) проверить состояние подшипников и при надобности сменить их |
| 2. Падение давления в системе маслоподачи | а) Подсос воздуха в насос вследствие понижения уровня масла в баке и обнажения приемного клапана | а) Выявить причину недостачи масла и пополнить бак до нормального уровня |
| | б) Утечка масла вследствие негерметичности масляной системы | б) Устранить неплотности в масляной системе |
| 3. Повышение давления масла перед фильтром | Загрязнение фильтра | Очистить фильтр и промыть сетки керосином |
| 4. Недостаточное охлаждение масла в холодильнике | Недостаточная подача охлаждающей воды в холодильник | Увеличить подачу воды |
| 5. Повышение температуры подшипников редуктора свыше нормы | а) Недостаточное количество масла или высокая температура его по причинам, указанным в п. 2, 3 и 4 | а) Действовать согласно п. 2, 3 и 4; если температура достигнет 70 °С, остановить агрегат и произвести ревизию масляной системы и редуктора |
| | б) Загрязнение масла или ухудшение его смазывающих свойств | б) Проверить качество масла, при необходимости сделать анализ, в случае неудовлетворительных результатов масло слить, осмотреть подшипники, зубчатое зацепление, сетки фильтра и промыть их керосином; залить свежее масло |

*Продолжение*

| Неполадки | Причины возникновения | Способы устранения |
|---|---|---|
| 6. Пропуск через уплотнение вала в корпусе турбодетандера | Износ колец уплотнения | Остановить и отогреть агрегат, отремонтировать кольца |
| 7. Значительное обмерзание кожуха турбодетандера, не связанное с утечкой газа | Ухудшение теплоизоляционных свойств изолирующего материала | Заменить изоляцию |

При работе турбодетандер издает ровное гудение постоянного тона. Незащищенная тепловой изоляцией часть вала детандера не должна сильно обмерзать и покрываться слоем льда.

При нарушении нормальной работы турбодетандера, в частности при внезапном увеличении числа оборотов, его следует немедленно остановить для выяснения и устранения причины неправильной работы.

**Остановка турбодетандера.** Закрывают вентиль подачи в него сжатого газа, после чего отключают электродвигатель, открывают вентиль на всасывающей трубе пускового масляного насоса и включают пусковой насос в работу до полной остановки турбодетандера. После полной остановки прекращают подачу воды в масляный холодильник.

Во всех случаях, требующих немедленной остановки турбодетандера, сначала закрывают шибер, пользуясь для этого аварийной ручкой, затем закрывают вентиль подачи сжатого газа в турбодетандер, включают пусковой маслонасос до полной остановки машины и, прекратив подачу воды в масляный холодильник, отключают электродвигатель.

**Возможные неполадки в работе турбодетандеров.** Основными неполадками в работе турбодетандеров являются: нарушение правильной работы масляной системы, загрязнение масла, попадание твердых частиц на лопатки колеса турбодетандера, повышенные вибрации ротора и вала турбодетандера вследствие выпадения твердой углекислоты и льда, утечки воздуха через неплотности или неисправные лабиринтные уплотнения вала, порча теплоизоляции. В тех случаях, когда неисправность угрожает сохранности агрегата, турбодетандер должен быть немедленно остановлен. Возможные неполадки в работе турбодетандерного агрегата, их причины и способы устранения указаны в табл. 6.3.

ГЛАВА 7

# ОЧИСТКА И ОСУШКА ВОЗДУХА И КИСЛОРОДА

Воздух, поступающий в компрессор, должен быть очищен от пыли, а перед разделительным аппаратом — от двуокиси углерода и влаги. Тщательная очистка воздуха от этих примесей — важное условие обеспечения длительного рабочего периода для всей установки.

Очистка перерабатываемого в установке атмосферного воздуха от примесей и его осушка выполняются разными способами в зависимости от свойств примесей и технологической схемы установки.

Для предупреждения взрывов в блоке разделения воздух необходимо также очищать от примеси ацетилена, других углеводородов и масла (см. гл. 14).

## 7.1. ОЧИСТКА ВОЗДУХА ОТ ПЫЛИ

Очистка воздуха от пыли производится фильтрами, установленными на всасывающих коммуникациях воздушных компрессоров.

Фильтр типа 1 (рис. 7.1, *а*) представляет собой сетчатый цилиндр из нескольких слоев латунной сетки № 2,5; 1,6 и 0,5. Сетки расположены так, чтобы отверстия уменьшались в направлении потока воздуха. Сетки смачиваются висциновым маслом, на пленке которого задерживаются твердые частицы. Такой фильтр может удерживать частицы размером от 10 до 100 *мкм* при содержании в воздухе не более 20 *мг/м*$^3$ пыли. Ставится фильтр непосредственно на всасывающую трубу воздушного компрессора. Такой фильтр применяется при расходе воздуха до 250 *м*$^3$*/ч*.

Фильтры ячейковые типа 2 (рис. 7.1, *б*) применяются в более крупных установках при расходе воздуха до 1300 *м*$^3$*/ч*. Ячейковый фильтр, показанный на рис. 7.1, *в*, используется при расходе от 2600 до 8000 *м*$^3$*/ч* воздуха.

Ячейковые фильтры представляют собой сварные камеры из листовой стали, в которые вставлены ячейки с кассетами, заполненными латунными кольцами Рашига (размером 10×10 *мм*), смо-

ченными висциновым маслом. Скорость воздуха должна быть в пределах 0,5—1,4 *м/сек*. В таких фильтрах используются кассеты двух размеров: 400×460×50 *мм* и 500×500×90 *мм*. Расход воздуха на одну кассету 400×460 *мм* составляет 650 $м^3/ч$, на кассету 500×500 *мм* — 1000—1200 $м^3/ч$.

Для крупных воздухоразделительных установок (БР-1, БР-5, БР-2 и др.) используются непрерывно действующие, самоочищающиеся цепные фильтры типа КДМ, устанавливаемые в воздухоприемных камерах турбокомпрессорных агрегатов (рис. 7.2, *а* и *б*). Ячейки (шторки) фильтра представляют собой рамки с натянутой на них в несколько слоев сеткой (отверстия 1 $мм^2$), укрепленной на движущейся пластинчатой цепи.

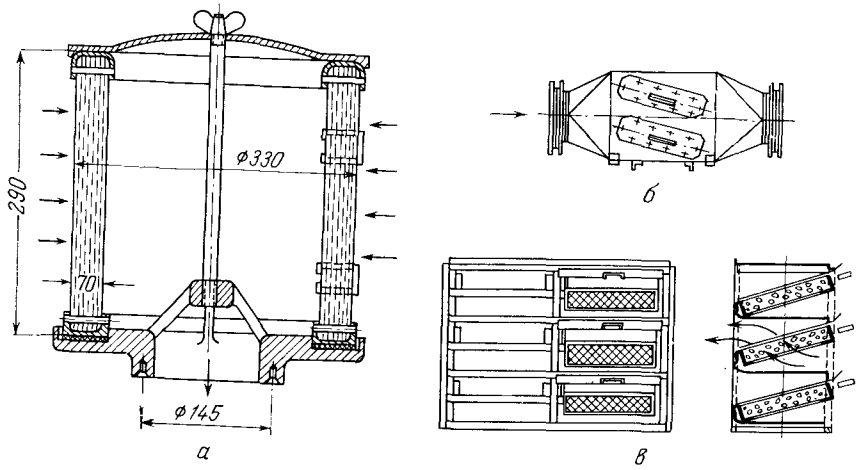



Рис. 7.1. Воздушные фильтры:
*а* — тип 1, сетчатый цилиндрический; *б* и *в* — тип 2, ячейковые.

При движении цепи шторки накладываются друг на друга, образуя сплошную поверхность, смоченную маслом. Шторки периодически проходят через ванну с маслом, расположенную в низу фильтра. Осевшая на сетках пыль остается в масляной ванне. Скорость движения цепи 1,8 *мм/мин*. Пропускная способность одной панели 20 000 $м^3/ч$ воздуха. В камере размещается от 1 до 6 панелей. В цепных фильтрах удерживается 96—98% пыли, содержащейся в воздухе.

Фильтр не должен создавать слишком большого сопротивления потоку воздуха, так как это снижает производительность компрессора, а следовательно, выход кислорода. Перепад давления в фильтре допускается не более 15—20 *мм вод. ст.* для поршневых компрессоров и 8—10 *мм вод. ст.* для турбокомпрессоров.

Количество пыли в профильтрованном воздухе не должно превышать 0,5 $мг/м^3$ воздуха. Сопротивление воздуху создается не



только в фильтре, но и во всасывающей трубе. Общее сопротивление всасывающей трубы вместе с фильтром—не более 150 *мм вод. ст.* Исходя из этого, всасывающую трубу берут достаточного сечения, с возможно меньшим числом изгибов, крутых поворотов, колен, и прочих мест, создающих дополнительное сопротивление потоку воздуха.

На каждом компрессоре устанавливают отдельный воздушный фильтр или фильтрационную камеру. При установке одного фильтра или общей камеры на несколько компрессоров степень очистки воздуха снижается, так как не обеспечивается равномерность потока воздуха через фильтрующий слой.

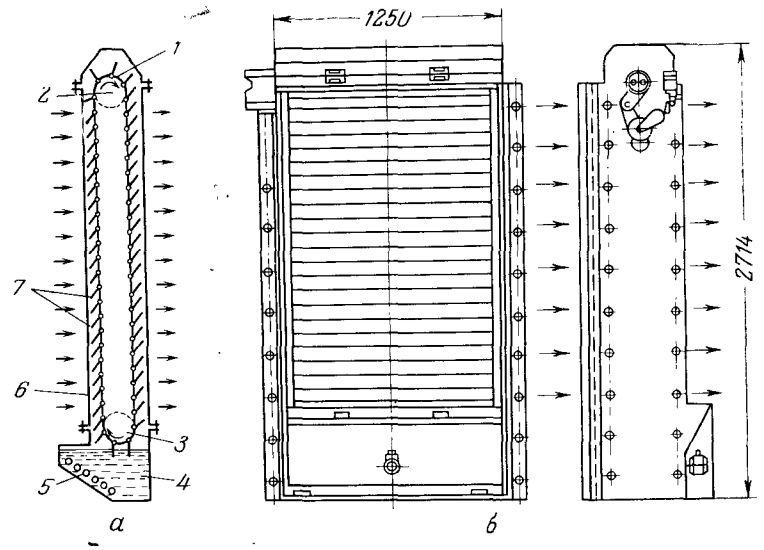



Рис. 7.2. Непрерывно действующий самоочищающийся цепной фильтр:
*а* — схема; *б* — внешний вид панели; *1, 3* — звездочки; *2* — пластинчатая цепь; *4* — резервуар с маслом; *5* — змеевик для обогрева масла; *6* — кожух; *7* — рамки с сеткой.

Воздушные фильтры не требуют специального обслуживания. Необходимо лишь следить за чистотой всасывающей трубы и отсеков пыльной камеры, не допускать скопления в них атмосферных осадков — влаги или снега, а также контролировать сопротивление фильтра по показаниям дифманометра.

В тех случаях, когда сопротивление фильтра вследствие загрязнения его пылью превысит 40 *мм вод. ст.*, кассеты очищают. Очистку фильтров и их кассет следует производить также при каждой остановке воздухоразделительного аппарата на отогрев, но не реже одного раза в 3 месяца. Загрязненные кассеты промывают в слабом горячем растворе едкого натра или керосине. Затем

их промывают водой, просушивают и на насадку наносят слой масла кистью или погружая кассеты в сосуд с маслом. Спустя несколько часов, когда избыток масла стечет с колец кассеты, ее вставляют в фильтр. Вся кассета должна быть равномерно заполнена насадкой, чтобы в ней не оставалось свободного пространства, по которому воздух мог бы проходить, минуя смазанные маслом кольца насадки.

Воздушные фильтры не должны иметь неплотностей; необходимо следить за тем, чтобы уплотняющие прокладки были целы, а болты хорошо затянуты.

Висциновое масло (ГОСТ 7611—55*) представляет собой смесь, содержащую 60% компрессорного и 40% солярового масел; плотность масла 0,938 *г/см*³, вязкость 19—24 сст при 50 °С, температура застывания — 20 °С. Висциновое масло можно приготовить смешением веретенного масла с полугудроном или с вискозином (ГОСТ 1841—51) в пропорциях, обеспечивающих требуемую вязкость. Для фильтров применяется также трансформаторное масло (ГОСТ 982—56*) и веретенное АУ (ГОСТ 1642—50*).

В тех случаях, когда попадание масла в компримируемый воздух недопустимо, применяют безмасляные фильтры: сухие или смачиваемые водоглицериновым раствором.

В качестве сухих фильтров применяют ячейковые, рулонные и самоочищающиеся сетчатые.

Ячейковые фильтры типа ФЯП, с заполнителем из модифицированного пенополиуретана. При пропускной способности 1540 *м*³/*ч* площадь рабочего сечения элемента фильтра равна 0,22 *м*², пылеемкость — 180 *г/м*², эффективность очистки — 70—80%, сопротивление — 6 *мм вод. ст.*

Рулонные фильтры типа ФРУ из фильтрующего упругого стекловолокнистого материала ФСВУ. Пропускная способность таких фильтров составляет от 20 000 до 120 000 *м*³/*ч*, сопротивление — 4—5 *мм вод. ст.*; площадь рабочего сечения — от 1,9 до 12 *м*², пылеемкость — до 300 *г/м*², ширина фильтрующего материала — от 770 до 1570 *мм*; скорость перемещения фильтрующего материала 50 *см/мин*. По мере загрязнения фильтрующего полотна его сопротивление возрастает. Когда сопротивление достигнет установленных пределов, часть полотна перематывается (вручную или автоматически) с верхней катушки на нижнюю до момента, когда сопротивление вновь снизится до начальной величины.

Самоочищающиеся (сетчатые) цепные фильтры, типа КДМ или ФШ, смачиваются водоглицериновым раствором (вместо масла). В зависимости от температуры окружающего воздуха содержание глицерина в растворе составляет от 20 (при —5 °С и выше) до 70 вес. % (при —40 °С). Глицерин должен быть высшего или 1-го сорта по ГОСТ 6824—54*. Для снижения коррозионной активности раствора в воду добавляют 2% хромовокислого калия ($K_2CrO_4$) и 0,13% едкого натра (NaOH) от массы глицерина.



Выбор системы очистки зависит от расхода воздуха и его запыленности. При запыленности воздуха до 10 *мг/м*³ и расходе до 10 000 *м*³/*ч* применяют ячейковые фильтры ФЯП и одноступенчатую очистку; при запыленности до 0,5 *мг/м*³ и расходе более 10 000 *м*³/*ч* — рулонные фильтры ФРУ и одноступенчатую очистку; при запыленности от 0,5 до 10 *мг/м*³ и расходе свыше 10 000 *м*³/*ч* для первой ступени очистки используют фильтры КДМ или ФШ, а для второй ступени очистки — рулонные ФРУ.

Для предупреждения сильного уноса стекловолокна и водноглицеринового раствора удельную нагрузку в безмасляных фильтрах принимают не более 8000 *м*³/(*м*²·*ч*).

Фильтрация безмасляными фильтрами является в настоящее время основным способом очистки воздуха от пыли на крупных воздухоразделительных станциях.

## 7.2. ОЧИСТКА ВОЗДУХА ОТ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА

Двуокись углерода $CO_2$ является постоянной примесью атмосферного воздуха. Среднее содержание ее в атмосферном воздухе составляет 0,03%, т. е. 300 см³, или 600 *мг* в 1 *м*³ воздуха, парциальное давление 0,0003·760=0,23 *мм рт. ст.* В тех районах, где в атмосферу выбрасывается значительное количество отходящих газов, содержание двуокиси углерода повышается.

При абсолютном давлении 760 *мм рт. ст.* двуокись углерода переходит в твердое состояние при —78,9 °С. Тройная точка двуокиси углерода соответствует температуре —56,6 °С и абсолютному давлению 5,28 *кгс/см*². Ниже этого давления и температуры двуокись углерода переходит в твердое состояние, минуя жидкую фазу. Парциальное абсолютное давление двуокиси углерода при наиболее высоких давлениях в воздухоразделительных аппаратах может достигать величины 0,0003·200=0,06 *кгс/см*². Поэтому выпадение двуокиси углерода из воздуха в аппарате возможно только в твердом виде.

Твердая двуокись углерода, выпадая в виде мельчайших кристаллов в разных частях воздухоразделительного аппарата, может забить теплообменные устройства, дроссельные вентили, ректификационные тарелки, вызвать этим нарушение технологического процесса или остановку аппарата на отогрев и продувку. Поэтому тщательная очистка воздуха от двуокиси углерода совершенно необходима для продолжительной и экономичной работы установки.

В воздухоразделительных установках очистка перерабатываемого воздуха от двуокиси углерода производится химическим или физическим способами.

### 7.2.1 Химический способ

Химический способ очистки воздуха основан на поглощении двуокиси углерода едким натром. Для этого сжатый воздух пропускают через водный раствор NaOH, который вступает в реакцию с $CO_2$ и образует карбонат натрия $Na_2CO_3$.

Этот способ применяется в стационарных установках выпуска прежних лет, использующих воздух высокого или среднего давления.

Едкий натр выпускается по ГОСТ 2263—59 двух сортов: сорт А с содержанием не менее 95% едкого натра и сорт Б с содержанием не менее 92% едкого натра. Содержание едкого натра в жидком каустике должно быть не менее 610 *г/дм*³, что соответствует 42%-ному раствору NaOH плотностью 1,453 *г/см*³.

Твердый каустик жадно поглощает влагу из воздуха, поэтому он выпускается в герметичных барабанах (из кровельной стали) емкостью 100—200 *кг*. В воде едкий натр растворяется с выделением тепла. Жидкий каустик отпускается потребителям в стальных бочках или в цистернах.

С каустиком или его растворами следует обращаться осторожно, так как они действуют разъедающе на кожу человека.

Ниже приводится описание аппаратуры для очистки воздуха от двуокиси углерода.

**Скрубберы.** Скруббер (рис. 7.3) представляет собой цилиндрический аппарат, сваренный из листовой малоуглеродистой стали. Башня *2* скруббера заполнена насадкой *3* из керамических колец (колец Рашига) диаметром 25 *мм* и длиной 25 *мм* или из металлических колец такого же размера, но свернутых из стальной полосы толщиной 0,8—1 *мм*. Для заполнения пространства объемом 1 *м*³ требуется около 55 тыс. колец. Насыпная плотность металлических колец 640—770 *кг/м*³, а поверхность их составляет 220 *м*²/*м*³ объема насадки.

Диаметр башни скруббера принимается таким, чтобы средняя скорость воздуха, отнесенная ко всему сечению башни, составляла 0,07—0,15 *м/сек*. Сверху насадка орошается циркулирующим раствором едкого натра, подаваемым насосом в количестве 190—210 *м*³/*ч* на 1 *м*² площади поперечного сечения башни. Воздух поступает по трубе *4* снизу и идет навстречу стекающему раствору. Насадка служит для увеличения поверхности соприкосновения воздуха с раствором, что улучшает процесс поглощения двуокиси углерода. На верху башни скруббера установлен сепаратор *1* для улавливания капель раствора, уносимых потоком воздуха.

Скрубберы включаются между I и II или между II и III ступенями воздушного компрессора и работают под избыточным давлением, благодаря чему уменьшаются их размеры, улучшается процесс поглощения двуокиси углерода и установка работает более надежно.

Количество двуокиси углерода, поглощаемой едким натром, зависит от содержания свободного едкого натра в растворе и определяется степенью использования щелочного раствора.



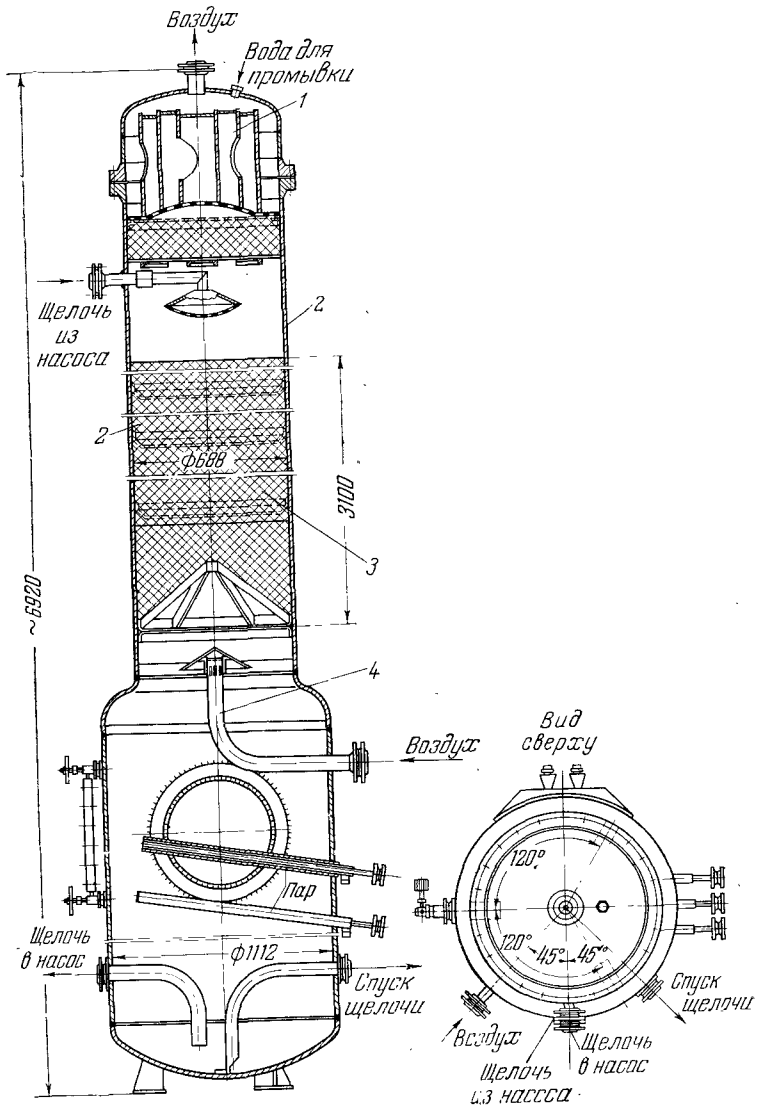



Рис. 7.3. Скруббер на 800 *м*³/*ч* воздуха к установке КТ-1000 (емкость нижней части 1,4 *м*³ раствора щелочи):

*1* — сепаратор; *2* — башня скруббера; *3* — насадка; *4* — труба подачи.

Если, например, степень использования раствора равна 65%, то это значит, что в нем осталось 35% свободного едкого натра, способного вступать в реакцию с двуокисью углерода, содержащейся в воздухе (остальные 65% едкого натра уже израсходованы на поглощение двуокиси углерода и превратились в карбонат натрия).

Едкий натр может достаточно хорошо поглощать двуокись углерода при использовании его раствора до 50—70%; в дальнейшем реакция связывания двуокиси углерода протекает менее интенсивно. При использовании раствора до 90% очистка воздуха ухудшается настолько, что содержание $CO_2$ в очищенном воздухе

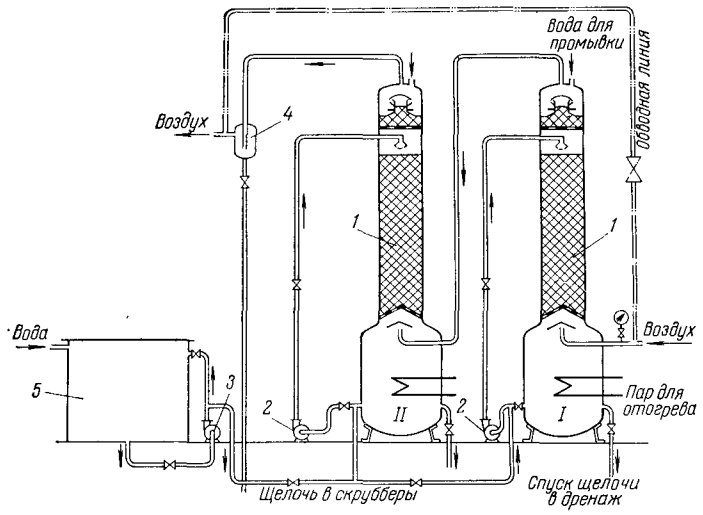



Рис. 7.4. Схема последовательного включения двух скрубберов:
*1* — скрубберы; *2* — циркуляционные щелочные насосы; *3* — насос для разбавления и перекачки раствора щелочи; *4* — отделитель щелочи; *5* — бак для приготовления щелочи.

возрастает в несколько раз по сравнению с тем, которое было в начальном периоде работы скруббера при свежем растворе. Поэтому в установках обычно используются два скруббера, включенных последовательно (рис. 7.4). В первом по ходу воздуха скруббере находится раствор с большей степенью использования, а во втором — свежий раствор. Таким способом удается понизить содержание двуокиси углерода после очистки до 10—15 *см*³ в 1 *м*³ воздуха, а использование раствора довести до 90—92%.

Смена раствора производится без остановки компрессора и перерыва в процессе очистки. Когда раствор в первом скруббере полностью отработан, его сливают, и скруббер заполняют свежим раствором из бака *5* с помощью насоса *3*.

Зависимость содержания $CO_2$ в воздухе от степени использования щелочи показана на рис. 7.5. В первом по ходу воздуха



скруббере щелочь используется на 80—85%. Содержание $CO_2$ в воздухе при орошении свежей щелочью составляет 13,5 *см*³/*м*³. При использовании щелочи в первом скруббере на 50% содержание $CO_2$ повышается до 16 *см*³/*м*³, при использовании на 80% — до 18 *см*³/*м*³, а на 90% — возрастает еще более резко. При 100%-ном использовании щелочи и неравномерном орошении насадки скруббера содержание $CO_2$ в очищенном воздухе повышается до 25—33 *см*³/*м*³.

Техническая характеристика скрубберов кислородных установок дана в табл. 7.1.

Для поглощения 1 *кг* двуокиси углерода теоретически (по уравнению)

$$\underset{2\cdot 40}{2NaOH} + \underset{44}{CO_2} = \underset{106}{Na_2CO_3} + \underset{18}{H_2O}$$

требуется $\frac{2\cdot 40}{44} = 1{,}82$ *кг* химически чистого NaOH или от 1,95 до 2,1 *кг* технического едкого натра. По количеству воздуха, проходящего через скруббер, можно подсчитать, через какой промежуток времени нужно переключать скрубберы.

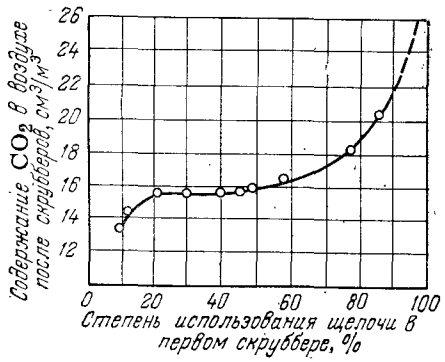



Рис. 7.5. Содержание $CO_2$ в воздухе после очистки в двух скрубберах в зависимости от степени использования щелочи в первом скруббере (по опытам И. С. Гузмана и И. П. Ишкина).

**Пример**. Скруббер содержит 1,4 *м*³ щелочного раствора крепостью 15° по Боме. Через него проходит 800 *м*³ воздуха в час. Приняв степень использования раствора в скруббере 70%, определить, через сколько времени нужно переключить скруббер.

Таблица 7.1. **Техническая характеристика скрубберов**

| Параметры | Тип кислородной установки | | | |
|---|---|---|---|---|
| | КГ-300М | КТ-1000М | КТ-3600 КТ-3600Ар | КТ-3600 и КЖ-1 |
| Пропускная способность скруббера, *м*³/*ч* воздуха | 400 | 800 | 2400 | 6800 |
| Рабочее избыточное давление, *кгс*/*см*² | 3,5 | 8,5 | 5 | 9 |
| Объем щелочи, *м*³ | 0,52 | 1,4 | 6 | 6,5 |
| Рабочая высота слоя насадки, *мм* | 3600 | 3100 | 5400 | 4500 |
| Диаметр, *мм* | | | | |
| насадочной части | 630 | 680 | 1000 | 1400 |
| нижней части | 1000 | 1100 | 2000 | 1800 |
| Общая высота, *мм* | 7200 | 6900 | 10 400 | 12 300 |
| Плотность орошения, *м*³/*ч* на 1 *м*² | 60 | 60 | 80 | 80 |
| Средняя скорость воздуха, *м*/*сек* | 0,078 | 0,063 | 0,14 | 0,12 |

По данным табл. 7.3 в 1 $м^3$ раствора данной крепости содержится 114,9 *кг* едкого натра. Количество двуокиси углерода в воздухе, проходящем через скруббер за сутки, составляет:

$$\frac{800 \cdot 0,6 \cdot 24}{1000} = 11,5 \text{ кг}$$

Количество едкого натра в растворе, использованное для поглощения $CO_2$

$$1,4 \cdot 114,9 \cdot 0,7 = 113 \text{ кг}$$

что достаточно для поглощения 113 : 2,1 = 54 *кг* двуокиси углерода.

Следовательно, скруббер необходимо переключить через

$$54 : 11,5 = 4,7, \text{ или 5 суток работы}$$

**Щелочные насосы.** Для перекачивания и подачи раствора щелочи в скрубберы используются центробежные щелочные насосы. Корпус насоса отлит из чугуна в форме улитки и внутри него находится стальное колесо с лопатками. При вращении колеса жидкость всасывается через центральное отверстие, выбрасывается под действием центробежной силы к периферии колеса и выходит через патрубок улитки в напорный трубопровод. Вал насоса соединен с электродвигателем через дисковую муфту. Насос и двигатель установлены на раме, укрепленной на фундаменте болтами. Вал выведен из корпуса насоса через сальник.

Пуск щелочного насоса производится в следующем порядке:

1) закрывают вентиль на всасывающем и открывают вентиль на нагнетательном трубопроводе насоса;

2) взявшись за муфту, поворачивают вал насоса от руки, чтобы проверить, свободно ли он вращается;

3) включают рубильник электродвигателя и медленно открывают вентиль на всасывающем трубопроводе насоса*.

При остановке насоса необходимо:

1) медленно закрыть вентили на всасывающей, а затем на нагнетательных линиях;

2) выключить рубильник электродвигателя.

В щелочных насосах, скрубберах и в арматуре не должно быть деталей, изготовленных из цветных металлов (латуни, бронзы, алюминия), так как эти металлы и их сплавы разъедаются едким натром; все части, непосредственно соприкасающиеся со щелочью, изготовляются из стали или чугуна. В качестве сальниковой набивки используются хлопчатобумажные концы. Смазывать набивку салом недопустимо, так как это ведет к быстрой порче набивки и пропуску в сальнике. Насос работает надежно, если всасывающая труба все время залита раствором; неплотности в соединениях трубопроводов и арматуры должны немедленно устраняться.

* Щелочной насос, как правило, работает под заливом, поэтому его пуск по описанному способу проходит без затруднений. Пускать насос при закрытом вентиле на напорной трубе и полностью открытом вентиле на всасывающей трубе не рекомендуется, так как при этом раствор нагревается и повышается нагрузка на сальник, что приводит к пропускам в сальнике.



**Декарбонизаторы.** Щелочные насосы несколько усложняют скрубберную систему воздухоочистки, хотя степень использования щелочного раствора при ней достигает 90—92%. Поэтому в кислородных установках небольшой производительности вместо скрубберов применяются так называемые декарбонизаторы, в которых принудительная циркуляция раствора заменена естественной циркуляцией, возникающей под действием струй сжатого воздуха при их барботаже через раствор, смачивающий насадку. Декарбонизаторы всегда работают под давлением и включаются между I и II или между II и III ступенями воздушного компрессора. Стальной корпус вертикального декарбонизатора (рис. 7.6) снабжен съемной крышкой *2*; внутри корпуса размещен цилиндр *5*. Между решетками *11* и *14* насыпана насадка *12* из колец Рашига.

Сжатый воздух поступает в декарбонизатор по трубе, имеющей сопла *9*, и, проходя через насадку, увлекает за собой раствор щелочи. Раствор, поднявшись до уровня отверстий *3*, сливается в укрепленный к крышке цилиндр *16*, из которого по трубе *7* направляется обратно в корпус декарбонизатора. Очищенный от двуокиси углерода воздух уходит по трубе *17*. Краны *13* служат для проверки уровня раствора в декарбонизаторе. По трубе *15* подается вода для промывки декарбонизатора, а по трубе *10* сливается использованный раствор. На крышке расположен рычажный предохранительный клапан *1*, а на трубе для подвода воздуха — обратный клапан *8*, препятствующий во время остановки компрессора выбрасыванию раствора щелочи обратно в трубопровод, идущий от декарбонизатора к компрессору. Труба *4* с краном служит для контроля за циркуляцией раствора в декарбонизаторе.

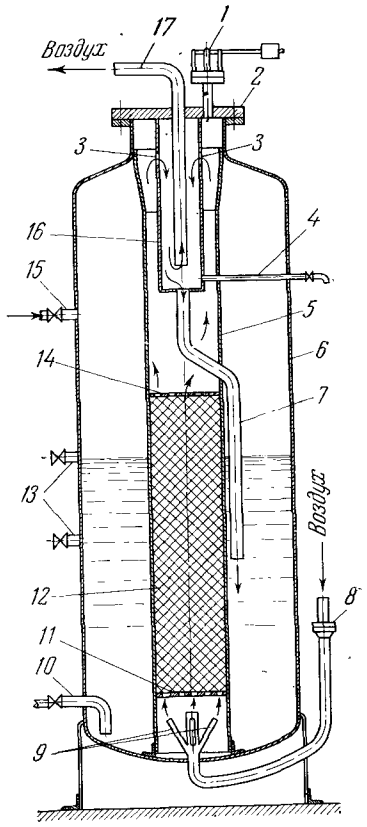



Рис. 7.6. Схема вертикального декарбонизатора:

*1* — предохранительный клапан; *2* — крышка; *3* — отверстия; *4* — трубка для проверки циркуляции раствора; *5* — внутренний цилиндр; *6* — корпус; *7* — переточная труба; *8* — обратный клапан; *9* — сопла; *10* — труба для слива раствора; *11*, *14* — решетки; *12* — насадка; *13* — контрольные краны; *15* — труба для промывной воды; *16* — цилиндр, укрепленный на крышке; *17* — труба отвода воздуха из декарбонизатора.

Техническая характеристика декарбонизаторов приведена в табл. 7.2.

Масло-, водо- и щелочеотделители устанавливаются снаружи, до и после декарбонизатора. На воздухопроводе перед декарбонизатором монтируется обводной вентиль для перепуска воздуха из II в III ступень компрессора помимо декарбонизатора. Это необходимо на время пуска компрессора, так как в противном случае

**Таблица 7.2. Техническая характеристика декарбонизаторов**

| Параметры | Тип установки | | |
|---|---|---|---|
| | СКАДС-17 и ЖА-20 | КГ-30 и КГН-30 | УКГС-100 |
| Пропускная способность декарбонизатора, *м³/ч* воздуха | 110 | 180 | 780 |
| Количество декарбонизаторов, шт. | 2 | 1 | 2 |
| Диаметр, *мм* | 400 | 670 | 1030 |
| Высота, *мм* | 1065 | 2400 | 4740 |
| Количество щелочи, *дм³* | 120 | 350 | 2600 |
| Избыточное рабочее давление, *кгс/см²* | 14 | 15 | 18 |
| Продолжительность работы до перезарядки, *ч* | 150—200 | 250—300 | 250—300 |

давлением воздуха раствор щелочи будет вытеснен в трубопровод к III ступени компрессора и может попасть в цилиндр, поскольку при пуске компрессора давление за декарбонизатором повышается медленнее, чем перед декарбонизатором. Когда же компрессор получит нормальное число оборотов и давление в III ступени станет выше, чем во II ступени, обводный вентиль медленно закрывают и постепенно весь воздух пропускают через декарбонизатор.

Перед остановкой компрессора также открывают обводной вентиль и только после этого спускают воздух из системы продувкой масловодоотделителей. Если этого не сделать, возможно забрасывание раствора щелочи в цилиндр компрессора.

Забрасывание щелочи из декарбонизатора в компрессор происходит также из-за ненормального вспенивания раствора. Как показали опыты В. В. Дильмана, Л. И. Казарновской и Я. П. Крафта, причиной этого может явиться попадание в раствор щелочи поверхностно-активных веществ, например продуктов разложения и окисления смазочных масел в цилиндрах компрессора. Минеральные масла при окислении дают жирные кислоты, которые, попадая в декарбонизатор вместе с воздухом, нейтрализуются щелочью и образуют мыла (натриевые соли жирных кислот), являющиеся активными пенообразователями. Пенообразующие вещества могут попасть в раствор также при загрязнении баков для приготовления раствора щелочи. В качестве средства предотвращения пенообразования рекомендуется добавлять в раствор трансформаторное масло в количестве 0,5 *см³* на 1 *дм³* раствора.

Необходимо обеспечивать чистоту баков, в которых приготовляется раствор щелочи, а также следить за температурным режимом сжатия воздуха в цилиндрах компрессора, не допуская повышения этой температуры сверх установленного предела. Использование раствора в декарбонизаторах достигает 70—80%. Эффективность очистки воздуха и степень использования раствора повышаются включением двух декарбонизаторов последовательно, подобно тому, как это делается при применении скрубберов.



В крупных установках, где бо́льшая часть воздуха охлаждается в регенераторах и одновременно очищается в них от влаги и двуокиси углерода, вымерзающих на холодных поверхностях насадки регенераторов, содержание $CO_2$ в 1 *м³* воздуха после регенераторов может достигать 20—28 *см³/м³* за счет уноса части твердой $CO_2$ потоком воздуха с насадки. Воздух, поступающий в куб нижней колонны, пропускается (промывается) через слой находящегося в ней жидкого воздуха, тем самым освобождая воздух от твердой $CO_2$. При этом часть $CO_2$ может растворяться в жидком воздухе: 5—6 *см³* в 1 *м³* воздуха (в пересчете на газ). Общее содержание $CO_2$ в кубовой жидкости в данном случае достигает 50—60 *см³/м³*. Для очистки от $CO_2$ кубовая жидкость перед подачей в верхнюю колонну пропускается через керамические фильтры или фильтры из пористого металла, которые удерживают до 88% твердой $CO_2$. Осевшая в порах фильтров твердая $CO_2$ затем удаляется испарением и продувкой при периодических отогревах фильтров.

Следует указать, что и после очистки воздуха описанными методами часть двуокиси углерода все же попадает в конденсатор.

Как показывает опыт, при нормальной очистке воздуха от $CO_2$ в скрубберах содержание двуокиси углерода в жидком кислороде из конденсатора составляет: при отборе только жидкого кислорода 2—4 *см³* на 1 *дм³* $O_2$, а при отборе только газообразного кислорода — до 8 *см³* на 1 *дм³* $O_2$.

**Обслуживание аппаратуры для щелочной очистки воздуха от двуокиси углерода.** Раствор едкого натра приготовляют в стальном баке, куда помещают куски едкого натра и заливают их водой. Для того чтобы ускорить растворение каустика, раствор перемешивается циркуляционным насосом; в баке помещается змеевик, по которому при необходимости пропускается пар для подогрева раствора. Готовый раствор подается насосом из бака в скруббер или декарбонизатор.

Раствор приготовляется определенной концентрации (плотности), что проверяется ареометром. При растворении щелочи температура раствора повышается, поэтому плотность раствора определяют после остывания пробы до 20 °С. Соотношение между градусами Боме, плотностью раствора и содержанием в нем едкого натра дано в табл. 7.3.

Концентрацию раствора следует поддерживать 15—17° Боме. В зимнее время, если скрубберы установлены на всасывающей линии компрессора и температура раствора в скруббере может снижаться до +5 °С, во избежание выделения из раствора кристаллов твердого каустика концентрацию раствора снижают до 10—12° Боме.

Таблица 7.3 **Растворы, применяемые для поглощения $CO_2$ из воздуха**

| Градусы Боме | Плотность, *г/см³* | Содержание едкого натра | | Градусы Боме | Плотность, *г/см³* | Содержание едкого натра | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | вес. % | *кг/м³* | | | вес. % | *кг/м³* |
| 10 | 1,075 | 6,58 | 70,7 | 15 | 1,116 | 10,30 | 114,9 |
| 11 | 1,083 | 7,30 | 79,1 | 16 | 1,125 | 11,06 | 124,4 |
| 12 | 1,091 | 8,08 | 88,0 | 17 | 1,134 | 11,90 | 134,9 |
| 13 | 1,100 | 8,78 | 96,6 | 18 | 1,142 | 12,70 | 145,0 |
| 14 | 1,108 | 9,50 | 105,3 | | | | |

Через каждые два-три заполнения скруббера раствором насадку его промывают чистой водой (желательно подогретой до 60 °С). Один раз в год при капитальном ремонте установки насадку скруббера выгружают для проверки ее состояния и очистки от масла промывкой растворителем.

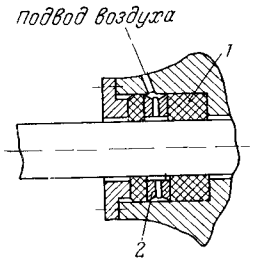



Рис. 7.7. Сальник с кольцом для подвода воздуха:
*1* — сальник; *2* — кольцо с отверстиями по периметру.

Отделители щелочи, установленные за скруббером, следует продувать каждый час во избежание скопления в них большого количества щелочного раствора и уноса его во всасывающие клапаны и цилиндры воздушного компрессора. Необходимо следить за тем, чтобы работа щелочных насосов протекала нормально, не было пропуска в сальниках насосов и соединениях трубопроводов; следует обеспечивать достаточную циркуляцию раствора в скруббере. Для предупреждения пропуска щелочи через сальник в него можно вставить кольцо с отверстиями, в которые подводят воздух, создающий в сальнике противодавление (рис. 7.7). Контроль за циркуляцией раствора в щелочном трубопроводе проводится через смотровые окна; в этих местах внутри трубы устанавливаются шарнирные флажки, которые откидываются потоком раствора, протекающего по трубе.

Если скруббер забивается кристаллами едкого натра, это указывает на понижение температуры раствора или слишком высокую его концентрацию. В этом случае раствор следует подогреть паром или разбавить водой до указанной в табл. 7.3 плотности. Когда в первом по ходу воздуха скруббере использование раствора достигнет 90—92%, что определяют анализом отработанной щелочи, раствор сливают и перекачивают жидкость из второго (по ходу воздуха) скруббера, который заполняют свежим раствором. В декарбонизаторах степень использования раствора щелочи доводят до 80—85%.

Степень очистки воздуха от $CO_2$ в скрубберах зависит также от плотности орошения насадки раствором щелочи. Наиболее подходящей является плотность орошения, близкая к «захлебыванию» скруббера. Поэтому следует всегда стремиться работать с полностью открытым вентилем на нагнетательной трубе щелочного циркуляционного насоса, не допуская, однако, «захлебывания» скруббера. «Захлебывание», на что указывает постепенное понижение уровня раствора в нижней части скруббера, следует устранять прикрывая вентиль на всасывающей трубе насоса до тех пор, пока уровень раствора не будет оставаться постоянным. Регулировать производительность насоса прикрытием напорного вентиля не следует во избежание перегрузки сальника и появления в нем пропусков.

Производительность щелочного насоса должна быть такой, чтобы количество раствора, подаваемого на верх скруббера, равнялось количеству раствора, стекающего по насадке. Если насос имеет слишком большую производительность, раствор будет накапливаться на верху скруббера и может попасть в цилиндр компрессора, что приведет к его поломке вследствие гидравлического удара. В целях предупреждения этого на некоторых установках монтируют байпасную линию для подачи избытка раствора обратно во всасывающую трубу насоса или внутри скруббера помещают вертикальную переливную трубу, по которой избыток раствора стекает помимо насадки в нижнюю часть скруббера. Для предупреждения выхода воздуха через переливную трубу нижний ее конец должен быть ниже уровня раствора в баке скруббера.

Во время работы декарбонизатора необходимо следить за тем, чтобы он был наполнен раствором до установленного уровня и чтобы циркуляция раствора в нем не прекращалась. Наличие циркуляции определяют открыванием соответствующих контрольных кранов. Если из них вытекает жидкость, это означает, что декарбонизатор работает нормально.

Если при очередном осмотре насадка в декарбонизаторе или скруббере окажется загрязненной маслом, которое заносится воздухом из компрессора, ее необходимо промыть растворителем, например четыреххлористым углеродом. Остатки растворителя должны быть тщательно удалены промывкой насадки водой. Следует также следить за исправностью обратного клапана декарбонизатора, проверять его состояние и герметичность при каждой остановке воздухоразделительного аппарата на отогрев.

Степень очистки воздуха от углекислого газа контролируют не только определением концентрации щелочного раствора, но и проведением раз в сутки анализа воздуха на содержание $CO_2$ после скруббера или декарбонизатора (методом количественного определения $CO_2$, см. разд. 13.5). Содержание $CO_2$ при нормальном процессе не должно превышать 0,0020%, или 20 *см³/м³* воздуха.

### 7.2.2. Физические способы

Химическому способу очистки воздуха от двуокиси углерода присущи следующие недостатки:

1) громоздкость оборудования и потребность в дополнительных площадях, что удорожает строительство и обслуживание воздухоразделительных станций;

2) использование едкой щелочи осложняет работу (загрязняет помещение) и представляет известную опасность для обслуживающего персонала (ожоги при попадании на кожу);

3) не обеспечивает высокой степени очистки воздуха от двуокиси углерода, вследствие чего сокращается продолжительность рабочей кампании и аппарат приходится отогревать для удаления отложений твердой $CO_2$.

Физические способы очистки воздуха от двуокиси углерода основаны на ее вымораживании, адсорбции и отмывке при низких температурах жидким воздухом. Они не имеют указанных выше недостатков и обеспечивают хорошую очистку воздуха от $CO_2$. Поэтому продолжительность непрерывной работы воздухоразделительной установки существенно удлиняется. Кроме того, эти способы обладают целым рядом других преимуществ. Вот почему в современных установках разделения воздуха физические способы очистки воздуха от $CO_2$ нашли широкое применение.

Рассмотрим эти способы подробнее.

**Вымораживание** двуокиси углерода осуществляется в регенераторах или теплообменниках. Последний способ использовался в установках низкого давления для получения жидкого кислорода, разработанных акад. П. Л. Капицей, а также применен в азотно-кислородных установках БР-6 и АКт-16-1. Применяются различные конструкции вымораживателей: пластинчатые; витые трубчатые высокого давления с прохождением очищаемого воздуха внутри трубок; низкого давления с прямыми трубками и прохождением очищаемого воздуха в межтрубном пространстве и др. Прямотрубные вымораживатели, используемые в установках с регенераторами, имеют в межтрубном пространстве поперечные перегородки для задержания кристаллов двуокиси углерода, выпадающих вследствие кратковременного возрастания скорости воздуха при переключении регенераторов.

Исследования показали, что для достижения заданной степени очистки воздуха процесс вымораживания $CO_2$ должен происходить при тепловом режиме, обеспечивающем кристаллизацию $CO_2$ только на холодной стенке, без выпадения снега углекислоты в потоке воздуха. При этих условиях количество $CO_2$ в очищенном воздухе будет равно или меньше содержания $CO_2$ в воздухе при насыщении для данной температуры и давления. Разность температур воздуха и холодной стенки не должна превышать 30 *град*, а скорость потока воздуха во избежание срыва инея со стенок и уноса кристаллов $CO_2$ — 3 *м/сек*.

Температура газа на выходе из теплообменника не должна повышаться во избежание ухудшения процесса очистки; постоянство температуры газа на выходе может быть достигнуто в том случае, если при определении поверхности теплообмена учитывать влияние слоя инея на коэффициент теплоотдачи от очищаемого воздуха к стенке (коэффициент теплоотдачи необходимо принимать в два раза меньше полученного расчетом для чистой стенки). При



исследованиях* был принят действительный коэффициент теплоотдачи 43,7 *ккал/(м²·ч·град)*. При этом общий коэффициент теплопередачи $K$ получается равным 27,5 *ккал/(м²·ч·град)*. Потребную поверхность теплообмена $F_т$ определяют по формуле

$$F_т = \frac{Q}{K\Delta t_{ср}} \qquad (7.1)$$

где $Q$ — тепловая нагрузка, *ккал/ч*;
$\Delta t_{ср}$ — средняя логарифмическая разность температур, *град*.

Вымораживание двуокиси углерода начинается в том сечении теплообменного аппарата, где температура воздуха равна температуре точки росы $CO_2$ при парциальном давлении ее в потоке воздуха. Для уменьшения размеров переключаемых вымораживателей температура воздуха на входе должна быть близка к температуре насыщения воздуха двуокисью углерода при заданном начальном содержании $CO_2$ в воздухе.

Например, для вымораживателей установки БР-6 приняты:

температура охлаждаемого потока (воздух из регенераторов) — на теплом конце вымораживателя 152 °К, на холодном 111 °К;

температура охлаждающего потока (детандерный воздух) — на теплом конце вымораживателя 143 °К, на холодном 99,8 °К.

В этих условиях $\Delta t_{ср} = 9{,}88$ *град*.

Параметры потоков следующие: охлаждаемый воздух 4260 *м³/ч*, абсолютное давление 6 *кгс/см²*; охлаждающий поток (детандерный воздух) 3960 *м³/ч*, абсолютное давление 5,95 *кгс/см²*.

Размеры поверхности вымораживания определяют по формуле

$$F_{вым} = \frac{G}{g_{ср}} \qquad (7.2)$$

где $G$ — количество $CO_2$, вымораживаемой на стенках труб, *кг/ч*;
$g_{ср}$ — средняя нагрузка по инею $CO_2$; принимается равной 0,01 *кг/(м²·ч)*;

Используются трубы размером 8 × 1 *мм*; длина трубы 5800 *мм*; шаг 14 *мм*; общее количество труб 1908 шт. При внутреннем диаметре обечайки 686 *мм* поверхность теплообмена по наружному диаметру труб равна 278 *м²*. Такой вымораживатель предназначен для тепловой нагрузки 60 000—75 000 *ккал/ч*.

Продолжительность работы вымораживателя до забивки пропорциональна его максимальной удельной нагрузке, т. е. количеству $CO_2$ в *кг/(м²·ч)*, высаживающейся в наиболее напряженном сечении. Для приближения максимальной удельной нагрузки к средней нагрузке следует по возможности подбирать такое соотношение потоков, чтобы разность температур на теплом конце вымораживателя не превышала среднелогарифмическую разность температур.

Очистка воздуха от двуокиси углерода и влаги вымораживанием их на насадке регенераторов происходит в процессе охлаждения воздуха в регенераторах. Поскольку этот процесс непосредственно связан с работой и конструкцией регенераторов, его описание приводится в гл. 8.

---

* Труды ВНИИКИМАШ, вып. 6, 1963, стр. 3—19.

**Адсорбция** двуокиси углерода осуществляется при низкой температуре. Адсорбцией называется *процесс поглощения газов, паров и жидкостей твердыми веществами с высокопористой структурой — адсорбентами* (силикагель, активная окись алюминия и др.). Поверхность пор измеряется сотнями квадратных метров на 1 *г* массы вещества адсорбента. Размеры пор настолько малы, что соизмеримы даже с размерами молекул газов. Адсорберы лучше всего поглощают вещества с высокой критической температурой. Из воздуха, например, хорошо адсорбируются ацетилен, двуокись углерода, водяные пары. При температуре около —130 °С и ниже твердая двуокись углерода хорошо адсорбируется из потока воздуха силикагелем и особенно — цеолитами (см. ниже).

Как показали опыты, в сжатом и охлажденном воздухе может содержаться твердой двуокиси углерода больше, чем это следует теоретически по кривой равновесия паров над твердой $CO_2$ для парциального давления двуокиси углерода при данном общем давлении и температуре смеси воздуха и $CO_2$. При давлении $p_a$ ниже 10 *кгс/см²* и температуре выше —110 °С это отклонение незначительно и может не приниматься во внимание. Однако при более высоких давлениях и более низких температурах разница между теоретическим и фактическим содержанием $CO_2$ в воздухе становится столь значительной, что ее необходимо учитывать, вводя величину коэффициента отклонения ($k$)

$$k = \frac{px}{p_s} \qquad (7.2)$$

где $p$ — абсолютное давление воздуха;
$x$ — доля $CO_2$ в воздухе;
$p_s$ — теоретическое парциальное давление $CO_2$;
$px$ — фактическое парциальное давление $CO_2$ в воздухе.

Этот коэффициент показывает отношение фактического парциального давления двуокиси углерода в воздухе к теоретическому, найденному по фазовой диаграмме равновесия паров над твердой $CO_2$ при данной температуре и давлении. Значения коэффициента $k$ приведены ниже:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Температура, °С | —110 | —121 | —130 | —140 | —145 | —150 |
| Теоретическое парциальное давление $CO_2$, $p_s$, *мм рт. ст.* | 34,63 | 8,57 | 2,31 | 0,431 | 0,168 | 0,060 |
| Значения коэффициента $k$ при абсолютном давлении (в *кгс/см²*) воздуха | | | | | | |
| 10 | 1,19 | 1,25 | 1,50 | 1,5 | 1,5 | 1,4 |
| 20 | 1,55 | 1,61 | 2,02 | 2,3 | 3,0 | 3,4 |
| 40 | 2,6 | 3,4 | 7,0 | 39,5 | 78 | 195 |
| 60 | 4,9 | 8,2 | 26,3 | 84,0 | 169 | — |
| 80 | 9,4 | 20,1 | 50,1 | 140 | 245 | 485 |
| 100 | 15,4 | 39,4 | 76,1 | 215 | 327 | 611 |
| 150 | 31,2 | 69,2 | 136 | 370 | 527 | 1040 |
| 200 | 54,0 | 103,0 | 200 | 542 | 775 | 1481 |



Из этих данных следует, что выделение твердой двуокиси углерода из воздуха в процессе охлаждения начинается при более низкой температуре, чем это следует из кривых фазового равновесия паров над твердой $CO_2$. Твердая двуокись углерода как бы растворена в сжатом и охлажденном воздухе и поэтому может быть удалена из него адсорбентом при весьма низких температурах.

На рис. 7.8 представлена зависимость упругости паров $CO_2$ над твердой двуокисью углерода от температуры (кривая *1*), подсчитанная по данным фазового равновесия, при содержании в воздухе 0,03% $CO_2$ при различных давлениях воздуха.

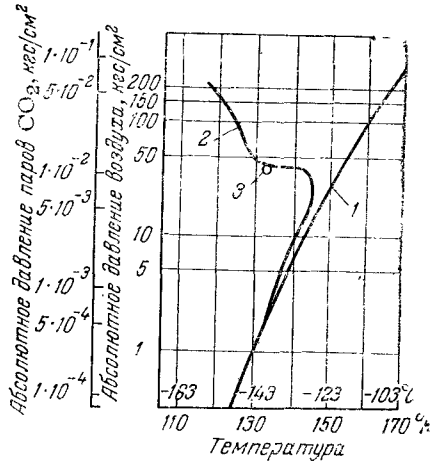



Рис. 7.8. Зависимость температуры выпадения $CO_2$ от давления воздуха:
*1* — упругость паров над твердой чистой $CO_2$; *2* — упругость паров $CO_2$ в смеси с воздухом при содержании $CO_2$ в воздухе 0,03 объемн.%; *3* — критическая точка для воздуха.

Кривая *1* показывает, что, например, при абсолютном давлении 200 *кгс/см²*, когда парциальное давление $CO_2$ в воздухе составляет 0,0003·200 = 0,06 *кгс/см²*, двуокись углерода должна бы начать выпадать в твердом виде при температуре —106 °С и ниже. Однако в действительности этого не происходит.

На той же диаграмме нанесена кривая *2* фактического давления насыщения паров двуокиси углерода в воздухе при тех же абсолютных давлениях и содержании $CO_2$, равном 0,03%. Эта кривая показывает, что при абсолютном давлении 200 *кгс/см²* двуокись углерода начнет выпадать из воздуха в твердом виде только при —156 °С, т. е. на 50 *град* ниже, чем это следует по теоретической кривой *1* для того же парциального давления $CO_2$ в воздухе. Поэтому при абсолютном давлении 150—200 *кгс/см²* можно не опасаться выпадения твердой двуокиси углерода при охлаждении воздуха даже до температур минус 140—150 °С.

При адсорбционном способе очистки воздух из регенератора или теплообменника отбирается в силикагелевый адсорбер при температуре, близкой к точке вымерзания $CO_2$ при имеющемся давлении воздуха. Данный способ используется в установках низкого давления для очистки от $CO_2$ турбодетандерного воздуха, отбираемого из регенераторов в силикагелевый адсорбер при избыточном давлении 5 *кгс/см²* и температуре около —125 °С.

В некоторых кислородно-азотных установках высокого и среднего давления адсорбцию $CO_2$ из воздуха осуществляют при тем-

пературе минус 125—150 °С. Остаточное количество $CO_2$ составляет 0,1—0,5 *см³/м³* воздуха.

Установлено*, что хорошим адсорбентом для $CO_2$ является мелкопористый силикагель марки КСМ. Кривые (изотермы) поглощения двуокиси углерода силикагелем КСМ при низких температурах и высоких давлениях, полученные в опытах, показаны на рис. 7.9. Оптимальное давление сжатого газообразного воздуха, как видно из этих кривых, составляет 10—30 *кгс/см²*. В динамических условиях емкость силикагеля на 10—20% меньше, чем в статических.

Регенерация силикагеля и удаление из него двуокиси углерода (десорбция) производится сухим азотом или сухим воздухом, от-

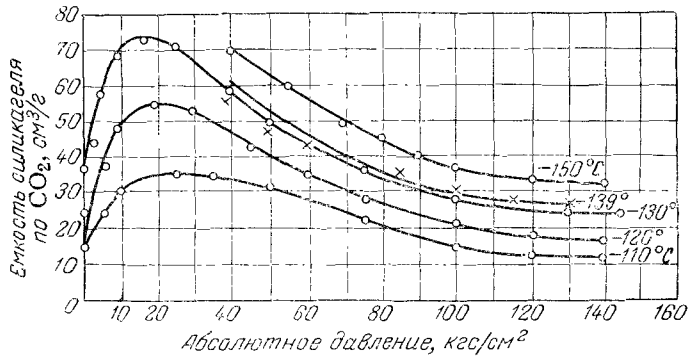



Рис. 7.9. Изотермы адсорбции двуокиси углерода кусковым силикагелем КСМ при низкой температуре и высоком давлении воздуха (по данным Н. Ф. Катиной).

водимым из аппарата с температурой 20 °С. Десорбция начинается при температуре выходящего из адсорбера газа минус 85—70 °С, а заканчивается при температуре —20 °С. Скорость греющего газа, во избежание измельчения силикагеля, не должна превышать 2 *дм/(мин·см²)*. После окончания десорбции силикагель должен быть вновь охлажден до рабочей температуры небольшим количеством холодного неочищенного воздуха, отбираемого в количестве 7—8% от воздуха, направляемого через второй (работающий) адсорбер.

Очистка воздуха от $CO_2$ адсорбцией на силикагеле применяется, например, в транспортных кислородно-азотных установках, работающих по циклу высокого давления с поршневым детандером. Часть воздуха высокого давления после теплообменника направляется при температуре —150 °С в адсорбер $CO_2$ высокого давления; остальное количество воздуха поступает в адсорбер $CO_2$ низкого давления, после расширения в детандере и охлаждения до —128 °С. Десорбция силикагеля в этих условиях производится сухим азотом. Адсорберы представляют собой цилиндрические сосуды из хромоникелевой хладостойкой стали, заполненные силикагелем. Очищаемый воздух и регенерирующий адсорбент азот поступают в адсорбер сверху и выходят снизу, что уменьшает истирание силикагеля потоками газов.

Способ адсорбции имеет то преимущество, что силикагель одновременно с $CO_2$ удерживает также основное количество ацетилена и других углеводородов, содержащихся в перерабатываемом воздухе. Это повышает безопасность работы воздухоразделительного аппарата, так как уменьшает вероятность накопления в нем взрывоопасных примесей (ацетилена, продуктов разложения масла и других углеводородов).

Так как ацетилен десорбируется при более высоких температурах, соответствующих пределам температуры греющего газа от —20 до 0 °С на выходе из адсорбера, то во избежание накопления ацетилена адсорбер необходимо раз в две недели прогревать до температуры выходящего регенерирующего газа, равной —5 °С; при этом ацетилен полностью удаляется из силикагеля.

**Отмывка** твердой двуокиси углерода жидким воздухом применяется в некоторых установках, работающих по циклу высокого давления с детандером. Двуокись углерода удаляется из воздуха вымораживанием в теплообменнике, с последующей отмывкой твердой $CO_2$ жидким воздухом на тарелках нижней колонны.

В поршневой детандер воздухоразделительных установок высокого давления воздух обычно поступает с температурой от —15 до —30 °С при абсолютном давлении 200 *кгс/см²* и расширяется до абсолютного давления в нижней колонне 6,5—7 *кгс/см²*, охлаждаясь при этом до температуры около —160 °С. В соответствии с кривой *2* на рис. 7.8 при этом уже может выпадать твердая двуокись углерода. Однако поскольку в цилиндре поршневого детандера давление в конце расширения составляет 20—25 *кгс/см²*, то $CO_2$ фактически не выпадает. Твердая двуокись углерода выпадает только при дальнейшем расширении воздуха в выпускном клапане детандера и трубопроводе; при большой скорости потока она уносится в куб нижней колонны или задерживается установленными на трубопроводе фильтрами для улавливания твердой $CO_2$.

Схема очистки воздуха высокого давления от $CO_2$ вымораживанием с последующей отмывкой твердой двуокиси углерода жидким воздухом показана на рис. 7.10.

Воздух, сжатый до избыточного давления 150—200 *кгс/см²*, осушенный и затем охлажденный в предварительном теплообменнике до температуры от —15 до —30 °С распределяется на два потока. Часть воздуха поступает в поршневой детандер *1*, а остальная часть идет в основной теплообменник *1*, где охлаждается до —150 °С, а затем через дроссельный вентиль *3* направляется в нижнюю колонну *4* аппарата двойной ректификации.

* Г. В. Васюнина, Н. Ф. Катина, Методы очистки воздуха от двуокиси углерода в воздухоразделительных установках. Сб. Кислородное машиностроение, изд. ЦИНТИАМ, 1963.

При дросселировании воздуха температура его понижается, и около 65% воздуха остается в виде жидкости. Выделяющаяся твердая $CO_2$ находится в жидком воздухе, образуя суспензию, и увлекается жидкостью в куб нижней колонны, куда вводится воздух, расширенный в детандере; воздух барботирует через слой жидкости, находящейся в кубе и на вышележащих тарелках, и при этом отмывается от двуокиси углерода. В нижней части колонны *4* установлены колпачковые тарелки, которые могут работать нормально даже в том случае, если в жидкости содержится некоторое количество твердой двуокиси углерода во взвешенном состоянии.

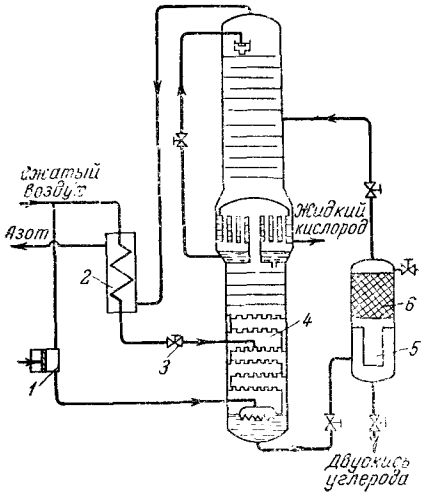



Рис. 7.10. Схема блока разделения установки жидкого кислорода с вымораживанием и отмывкой $CO_2$ из воздуха высокого давления:

*1* — поршневой детандер; *2* — основной теплообменник; *3* — дроссельный вентиль; *4* — нижняя колонна; *5* — фильтр; *6* — адсорбер.

Из куба нижней колонны *4* жидкость подается в фильтр *5*, где твердая $CO_2$ отделяется. В отфильтрованной жидкости остается около $3 \cdot 10^{-3}$% растворенной $CO_2$. Этот остаток поглощается при прохождении жидкости через адсорбер *6*, после чего она поступает в верхнюю колонну воздухоразделительного аппарата. Из фильтра *5* твердая $CO_2$ удаляется периодически, один раз в несколько дней.

Отмывка жидкого воздуха от частиц твердой двуокиси углерода на тарелках нижней колонны применяется также и в крупных установках с регенераторами с целью дополнительной очистки воздуха от $CO_2$. Двуокись углерода отмывается на нижних тарелках и концентрируется в кубовой жидкости, а затем отфильтровывается в керамических фильтрах или фильтрах из пористой бронзы, устанавливаемых перед кислородным дроссельным вентилем на трубопроводе подачи кубовой жидкости из нижней колонны в верхнюю. При этом удерживается около 90% двуокиси углерода, содержащейся в воздухе, поступающем из регенераторов в нижнюю колонну.

## 7.3. ОСУШКА ВОЗДУХА

Количество влаги, содержащейся в виде водяных паров в 1 $м^3$ воздуха при данной температуре, выраженное в граммах, называется *абсолютной влажностью воздуха*. Содержание влаги в воздухе зависит от температуры.



Если в воздухе содержится водяных паров больше, чем это допустимо при данной температуре, избыток их конденсируется и выпадает в виде капелек жидкости. Температура, при которой в воздухе начинает конденсироваться избыточная влага, называется *точкой росы*. С повышением температуры количество водяных паров, насыщающих воздух, увеличивается.

Наибольшее количество влаги, которое может содержаться в воздухе при давлении 760 *мм рт. ст.* и различной температуре, составляет:

| Точка росы, °C | Количество водяных паров, *г/м³* | Точка росы, °C | Количество водяных паров, *г/м³* |
|---|---|---|---|
| +30 | 30,21 | —20 | 1,05 |
| +20 | 17,22 | —30 | 0,44 |
| +5 | 6,82 | —40 | 0,177 |
| 0 | 4,89 | —50 | 0,038 |
| —10 | 2,31 | —60 | 0,011 |

Указанные количества влаги соответствуют 100%-ной влажности воздуха, который считается полностью насыщенным парами воды. Таким образом, наибольшее количество паров воды, которое может содержаться в 1 $м^3$ воздуха, определяется только его температурой и теоретически не зависит от давления.

Подвергнем 1 $м^3$ воздуха сжатию, например, до абсолютного давления 200 $кгс/см^2$. Рассматривая условно воздух как идеальный газ, получим при этом уменьшение объема воздуха в 200 раз. Количество паров воды, содержащихся в 1 $м^3$, при 30 °C и 200 $кгс/см^2$ равно:

$$30{,}21 \cdot \frac{1}{200} = 0{,}15 \text{ г}$$

Остальная влага (30,21—0,15=30,06 *г*) выделится в виде конденсата в процессе охлаждения сжатого воздуха в холодильнике.

Исследования показывают, что фактически в сильно сжатых реальных газах (воздухе, кислороде, азоте и др.) содержится влаги больше, чем это следует из приведенных данных, так как при сжатии показатели для этих газов отклоняются от уравнения идеального газа. Особенно это заметно при высоких давлениях (порядка 100—200 $кгс/см^2$) и низких температурах.

Для определения действительного количества водяных паров необходимо приведенные выше значения влагосодержания умножить на поправочный коэффициент $k$, значения которого при различных температурах и давлениях приведены ниже:

| При абсолютном давлении (в $кгс/см^2$) | Температура, °C | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | —35 | —20 | 0 | +15 | +50 |
| 50 | 1,6 | 1,36 | 1,24 | 1,19 | 1,14 |
| 100 | 2,17 | 1,82 | 1,48 | 1,36 | 1,28 |
| 150 | 2,92 | 2,24 | 1,78 | 1,58 | 1,42 |
| 200 | 3,14 | 2,39 | 2,01 | 1,77 | 1,56 |

Например, для 0 °С и 200 *кгс/см²* фактическое содержание влаги в воздухе при полном насыщении равно

$$\frac{4,89}{200} \cdot 2,01 = 4,9 \text{ г/м}^3$$

Влага, оставшаяся в воздухе, вымерзает на холодных частях кислородного аппарата и может вызвать нарушения его работы. Поэтому влагу необходимо возможно полнее удалить из поступающего воздуха путем осушки его.

Значительная часть водяных паров, содержащихся в воздухе, конденсируется при сжатии воздуха и последующем охлаждении его в холодильниках компрессора и выпадает в виде капель. Эта жидкость собирается в масловлагоотделителях, установленных после холодильников. Наряду с влагой в них собираются также и капельки масла, пары которого уносятся из компрессора вместе с воздухом.

Дальнейшая осушка воздуха после масловлагоотделителей производится адсорбцией или вымораживанием*.

### 7.3.1. Адсорбционная осушка

Водяные пары, имеющие критическую температуру 647,3 °К, хорошо поглощаются из воздуха различными адсорбентами: силикагелем, активным глиноземом, цеолитами и др. Некоторые адсорбенты способны удерживать водяной пар в количестве 10—20% веса поглотителя. Чем выше парциальное давление водяного пара в воздухе и чем ниже температура воздуха, тем больше влагоемкость адсорбента. При температуре воздуха выше 30 °С адсорбент плохо удерживает влагу и практически уже не действует. В процессе адсорбции выделяется теплота смачивания и теплота конденсации, что повышает температуру адсорбента и снижает его поглотительную способность.

При осушке воздуха высокого давления тепловой эффект адсорбции незначителен, так как газ содержит мало влаги и поэтому теплота в достаточной степени отводится самим осушаемым газом. При осушке газов низкого давления, содержащих большее количество водяных паров, выделяется значительно больше теплоты и адсорбент приходится дополнительно охлаждать.

---

* Химический способ осушки воздуха кусковым едким натром в кислородных установках сейчас не применяется ввиду его низкой эффективности по степени осушки. На действующих установках выпуска прежних лет он повсеместно заменен осушкой адсорбентами.

Химическую осушку иногда применяют для инертных газов (криптона), где нежелательны потери газа при переключении адсорберов. В этом случае используют технический едкий кали по ГОСТ 9285—69, обеспечивающий остаточное содержание влаги после осушки 0,014 *г/м³*.



Осушка воздуха адсорбентами наиболее совершенна, так как при ней содержание влаги в воздухе во много раз меньше, чем при осушке едким натром, как это видно из следующих данных:

| | Содержание влаги в воздухе после осушки, *г/м³* | Температура точки росы, соответствующая остаточному количеству влаги, °С |
|---|---|---|
| Сорбент | | |
| хлорид кальция | 1,5 | —14 |
| едкий натр | 0,8 | —19 |
| силикагель | 0,03 | —52 |
| едкое кали | 0,014 | —58 |
| алюмогель $Al_2O_3 \cdot H_2O$ | 0,005 | —64 |
| активный глинозем | 0,005 | —64 |
| цеолиты | 0,011—0,003 | —60÷—70 |
| Охлаждение до —45 °С | 0,67 | —45 |

Большое достоинство адсорбционного способа осушки заключается в том, что осушающее вещество (адсорбент) не расходуется, а периодически подвергается регенерации для восстановления его влагопоглотительной способности путем высушивания отходящим нагретым азотом. При осушке адсорбентом не требуется периодически продувать осушительные баллоны, что сокращает расход воздуха и электроэнергии на его сжатие.

Лучшая осушка воздуха способствует тому, что продолжительность непрерывной работы установки между двумя отогревами увеличивается в 2—3 раза. Применение адсорбента почти полностью предотвращает занос вместе с воздухом в кислородный аппарат каустика и продуктов разложения масла.

При применении адсорбционной осушки количество кислорода, вырабатываемое установкой за одну кампанию, увеличивается на 7—10%. Отпадает необходимость проведения трудоемкой и тяжелой работы по перезарядке осушительной батареи и сокращается общий расход щелочи.

Силикагель (ГОСТ 3956—54) представляет собой твердое, стекловидное, химически инертное, однородное, высокопористое вещество, состоящее на 99% из двуокиси кремния $SiO_2$. Выпускается в виде крупных или мелких зерен белого или светло-желтого цвета.

Для поглощения ацетилена используется силикагель КСК (крупнопористый), выпускаемый в зернах размером 2,8—7 *мм*, или КСМ (мелкопористый); для осушки газов и поддержания вакуума в сосудах Дьюара — силикагель только марки КСМ.

Силикагель просеивают через сито с отверстиями 2,5 и 8 *мм*; зерна его должны выдерживать нагрузку на раздавливание 2—6 *кгс*. Объемная масса силикагеля КСК равна 0,4—0,5 *кг/дм³*, а КСМ — 0,67 *кг/дм³*. Влажность силикагеля, загружаемого в аппарат, не должна превышать 2%. Силикагель поставляют в четырехслойных бумажных мешках (нетто от 20 до 45 *кг*).

Активный глинозем, применяемый для осушки воздуха (МРТУ-6 08-84—68) получается путем герметической активации кускового гидрата окиси алюминия ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) и имеет тонкую пористую структуру. Активный глинозем содержит 92% окиси алюминия, остальное — различные примеси; химически инертен, не ядовит, не растворяется в воде; объемная масса его должна

быть не более 0,89 *кг/дм*³ (активный глинозем с большим объемным весом непри годен для применения в качестве адсорбента).

Активный глинозем выпускается в виде непрозрачных зерен белого или свет ло-серого цвета размером 3—7 *мм*; поставляется и хранится в герметической та ре. Активный глинозем должен обладать влагоемкостью не ниже 14 вес. %. С по нижением температуры осушаемого воздуха и повышением упругости в нем водя ных паров влагоемкость повышается. В качестве адсорбента для осушки можно также применять активную окись алюминия (А-2) по ГОСТ 8136—56.

**Техническая характеристика перечисленных адсорбентов**

| | Силикагель КСМ | Силикагель КСК | Активный глинозем | Активная окись алюминия А-2 |
|---|---|---|---|---|
| Объем, % | | | | |
| пустот | 43 | 50 | 45 | 50 |
| пор | 24 | 30 | 30 | 25 |
| Эффективный радиус пор, Å | 25—40 | 50—100 | 12—13 | 12—13 |
| Удельная поверхность, *м*²/*г* | 400—600 | 100—300 | 300—350 | 300—350 |
| Теплоемкость, *ккал*/(*кг·град*) | 0,24 | 0,24 | 0,21 | 0,21 |
| Прочность на истирание, вес. % | 94—98 | 80—85 | 94—98 | 98 |

Адсорбенты, засыпаемые в аппараты, периодически подвергают регенерации для восстановления их первоначальных поглотительных (адсорбционных) свойств. Поэтому расход адсорбентов не-

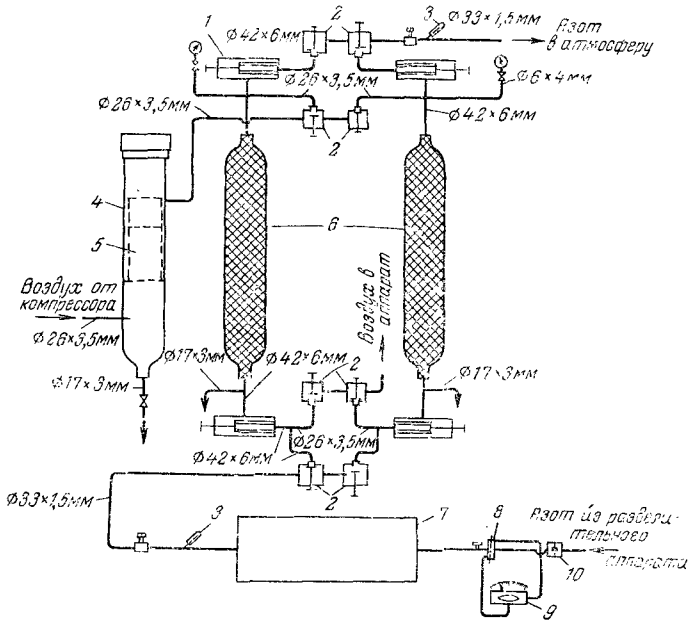



Рис. 7.11. Схема блока адсорбционной осушки воздуха:
*1* — фильтры; *2* — вентили; *3* — термометры; *4* — влагоотделитель; *5* — патрон с насадкой; *6* — осушительные баллоны (адсорберы); *7* — электронагреватель для азота; *8* — измерительная диафрагма; *9* — дифманометр; *10* — заслонка.



значителен. Полную замену адсорбента, в зависимости от степени их загрязненности маслом, производят по мере надобности, при очередных ревизиях и осмотрах блоков осушки и адсорберов ацетилена.

На активном глиноземе достигается более высокая степень осушки воздуха, чем на силикагеле, кроме того, глинозем обладает большей механической прочностью и не разрушается при попадании на него капельной влаги. По этим причинам для осушки в установках разделения воздуха предпочтительно применяется активный глинозем.

### 7.3.2. Конструкция блоков осушки

В блок адсорбционной осушки воздуха входят два стальных баллона, рассчитанные на соответствующее рабочее давление (рис. 7.11). Воздух, пройдя влагоотделитель *4*, входит в баллоны сверху и выходит снизу; в влагоотделителе находится патрон *5* с насадкой из колец Рашига. Диаметр осушительных баллонов рассчитывается по допускаемой объемной скорости потока, отнесенной к свободному сечению баллона, при температуре и давлении сжатого газа (см. ниже). Баллоны доверху заполнены адсорбентом. На трубопроводе между баллонами и кислородным аппаратом установлены войлочные или керамические фильтры *1* для улавливания пылевидных частиц

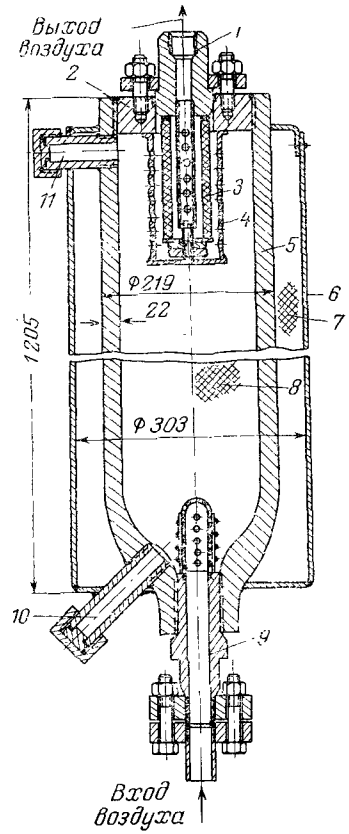



Рис. 7.12. Адсорбер блока осушки КГН-30:
*1, 9* — выходной и входной патрубки; *2* — крышка; *3* — фильтр керамический; *4* — стальной стакан с отверстиями; *5* — баллон одногорлый; *6* — кожух; *7* — шлаковая вата; *8* — активный глинозем, *10* *11* — штуцера для выгрузки и загрузки адсорбента.

адсорбента. В целях уменьшения габаритов блоков осушки фильтр для улавливания пыли адсорбента может быть размещен внутри самого баллона (рис. 7.12).

Азот, используемый для регенерации адсорбента, подогревается в электронагревателе (см. рис. 7.11); расход его измеряется диафрагмой *8* с дифманометром *9* и регулируется заслонкой *10*. Блок осушки снабжен терморегулятором, автоматически поддерживающим температуру азота в процессе регенерации. Как толь-

ко процесс регенерации заканчивается, терморегулятор автоматически прекращает подогрев азота. Выключение печи для подогрева азота указывается сигнальными лампами на щите управления Для контроля температуры азота до и после осушителя установлены термометры *3*. Переключение потоков воздуха и азота производится вентилями *2*.

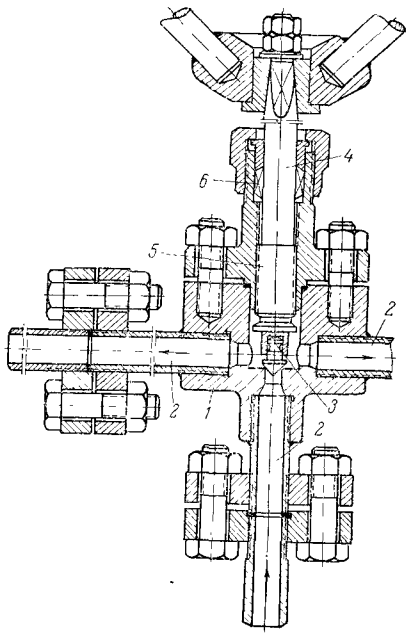



Рис. 7.13. Двойной вентиль:

*1* — корпус; *2* — патрубки; *3* — клапан; *4* — шпиндель; *5* — резьба; *6* — сальник.

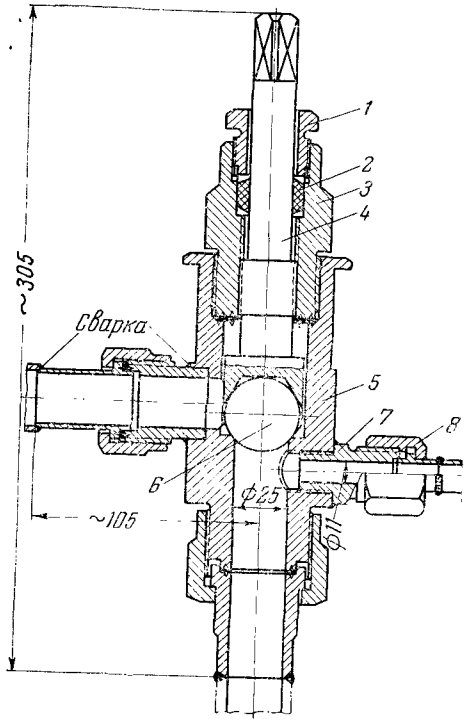



Рис. 7.14. Запорный вентиль с шариковым клапаном:

*1* — сальниковая гайка; *2* — сальниковая набивка из асбестового шнура; *3* — корпус сальника; *4* — шток; *5* — корпус вентиля; *6* — шарик; *7* — штуцер; *8* — накидная гайка.

В качестве вентилей применяют специальные двойные вентили (рис. 7.13), вентили с шариковым клапаном (рис. 7.14) или серийно выпускаемые арматурными заводами вентили 15с76нж.

Адсорберы заключены в кожух, заполненный шлаковой ватой для теплоизоляции. Шпиндели и клапаны вентилей должны быть изготовлены из нержавеющей стали.

Герметичность вентилей блоков осушки воздуха должна быть высокой, так как пропуск в них воздуха приводит к утечке его из системы, понижению производительности установки и нарушению



нормальной работы блока осушки в период его регенерации.

Вентили на линии регенерирующего азота должны иметь незначительное сопротивление потоку газа.

Адсорберы блока осушки работают попеременно. В то время как через один адсорбер проходит осушаемый воздух, во втором происходит регенерация адсорбента продувкой подогретым сухим азотом. Температура азота при работе на силикагеле должна быть не менее 170—180 °С, а при работе на

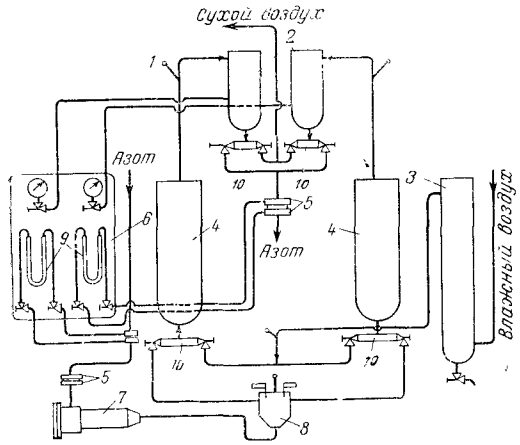



Рис. 7.15. Схема блока осушки воздуха установки КЖ-1:

*1* — термометр; *2* — баллоны керамических фильтров; *3* — фильтр-влагоотделитель; *4* — осушительные баллоны (адсорберы); *5* — диафрагмы; *6* — щит с контрольно-измерительными приборами; *7* — подогреватель регенерирующего азота; *8* — терморегулятор; *9* — дифманометры; *10* — запорные вентили.

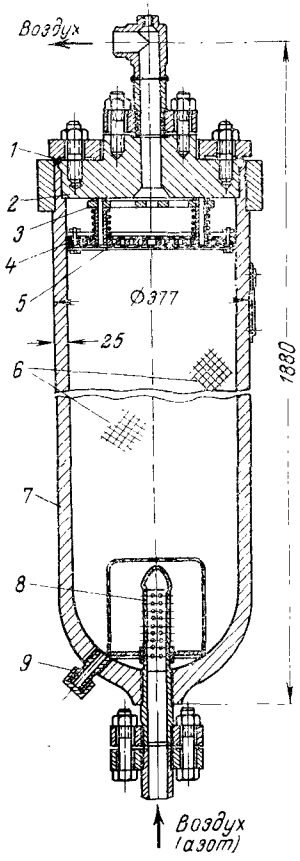



Рис. 7.16. Осушительный баллон блока осушки воздуха:

*1* — самоуплотняющаяся металлическая прокладка; *2* — крышка; *3* — нажимной диск; *4* — сальниковое уплотнительное кольцо; *5* — решетка с сеткой; *6* — адсорбент; *7* — баллон; *8* — перфорированная трубка с сеткой; *9* — патрубок для удаления адсорбента.

активном глиноземе 250—280 °С, расход азота 100—110 $м^3/ч$. Продолжительность периода регенерации 3—4 *ч*.

В блоке осушки воздуха (рис. 7.15) установок КЖ-1, КТ-1000, КГ-300М используются два одногорлых баллона — адсорбера *4* диаметром 377×25 *мм* длиной 1900 *мм*, снабженные крышками; высота слоя адсорбента в каждом баллоне 1600 *мм* (рис. 7.16). Перед блоком установлен фильтр-влагоотделитель *3* (см. рис. 7.15), внутри которого помещена корзина с активным глиноземом и керами-

ческий стакан, служащий фильтром для удерживания пыли адсорбента.

После баллонов-адсорберов воздух проходит керамические фильтры *2*, изготовляемые также из баллонов диаметром 219—22 *мм*; длина баллона фильтра — 600 *мм* (рис. 7.17). В этих баллонах установлены стаканы из пористой керамики (наружный диаметр 154 *мм*, внутренний диаметр 133 *мм*, высота 255 *мм*). Блок осушки снабжается распределительными вентилями высокого давления, терморегулятором, щитом контрольно-измерительных приборов, подогревателем регенерирующего азота со спиралями на 3 и 5 *квт*. На трубопроводах азота установлены измерительные

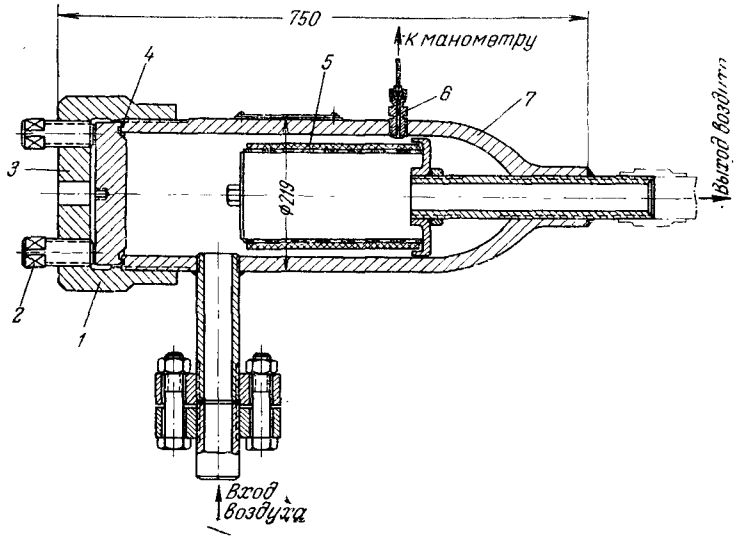



Рис. 7.17. Фильтр керамический:
*1* — крышка наружная; *2* — нажимные шпильки; *3* — уплотняющая крышка, *4* — прокладка; *5* — стакан керамический; *6* — штуцер трубки к манометру; *7* — баллон одногорлый.

диафрагмы, термометры и манометры для контроля расхода, температуры и давления азота, подаваемого в блок при регенерации адсорбента; контролируется также давление и температура осушаемого воздуха. Электронагреватель азота (рис. 7.18) имеет две нагревательные секции мощностью 5 и 2,5 *квт* из стандартных нагревательных элементов (свечей). Секция мощностью 2,5 *квт* подключена через реле и терморегулятор и выключается при повышении температуры азота до 260 °С.



Техническая характеристика блоков осушки воздуха приведена в табл. 7.4.

На Балашихинском кислородном заводе для улучшения работы блоков осушки были проведены следующие мероприятия:

1) для уменьшения истирания адсорбента на каждом входном патрубке баллона поставлены перфорированные колпаки с сетками, что уменьшило скорость входа потока воздуха в баллон;

2) в баллоне-фильтре вместо керамического стакана установлены стальной перфорированный стакан, обтянутый шинельным сукном, как более удобный в эксплуатации (применять войлок можно лишь в тех случаях, когда через фильтр не проходит газ, нагретый до высокой температуры);

3) медная уплотняющая прокладка крышки заменена алюминиевой проволокой диаметром 5 *мм;*

4) азот для регенерации подводится помимо воздушных фильтров, что снизило сопротивление на линии азота и сократило время регенерации;

5) воздух подводится сверху баллона, а регенерирующий азот — снизу, что уменьшило истирание адсорбента при пульсации потока воздуха, вызываемой работой детандера;

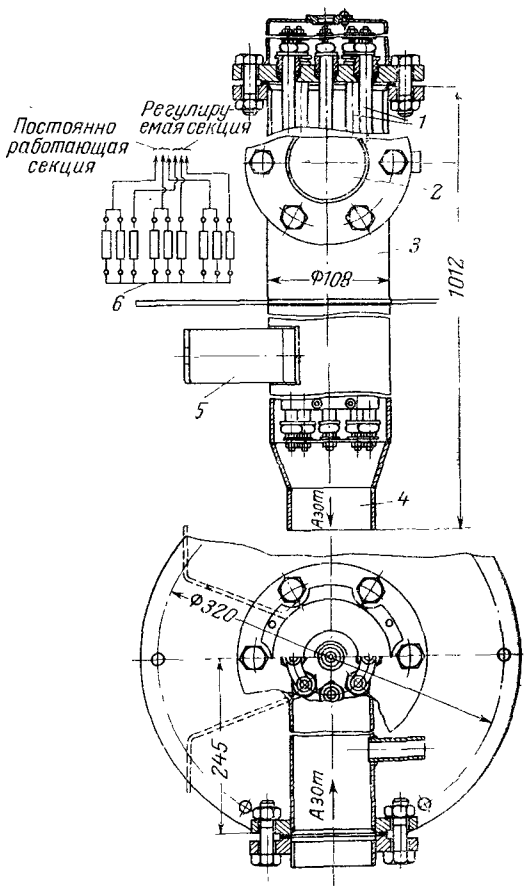



Рис. 7.18. Электронагреватель азота:
*1* — нагревательные элементы; *2* — патрубок входа азота; *3* — корпус; *4* — патрубок выхода азота; *5* — кронштейн; *6* — схема соединения нагревательных элементов.

6) для уменьшения скорости воздуха в блоке осушки баллоны включены параллельно.

Способность поглощения влаги активным глиноземом в статических условиях, т. е. когда соприкасающийся с ним воздух неподвижен, зависит от влажности воздуха.

Таблица 7.4. **Техническая характеристика блоков осушки воздуха**

| | Установки | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | СКАДС-17 | КТН-30 | УКГС-100 | КГ-300М | КТ-1000 | КЖ; КГ-1000; КГ-300М |
| Блок (№ чертежа) | — | 5412 | 294—4 | 1173 | 126—1 | СВ-302 или СБ-1303 |
| Количество активного глинозема, *кг* | | | | | | |
| в одном баллоне | 12 | 28 | 120 | 28 | 100 | 115 |
| в блоке | 24 | 56 | 480 | 112 | 200 | 230 |
| в фильтре-влагоотделителе | — | 15 | — | 15 | 15 | 15 |
| Наименьшее допускаемое избыточное рабочее давление воздуха в блоке, *кгс/см²* | 45—50 | 75 | 30 | 75 | 75 | 75—180* |
| Максимальное количество воздуха, *м³/ч* на блок | 110 | 180 | 780 | 420 | 800 | 400—2200 |
| Расход азота при регенерации, *м³/ч* | 15—17 | 25—30 | до 160 | 45—50 | 105—120 | 70 |
| Избыточное давление азота, *кгс/см²* | 0,4—0,6 | 0,4—0,6 | 0,4—0,6 | 0,4—0,6 | 0,4—0,6 | 0,4—0,6 |
| Мощность электроподогревателя, *квт* | 1,8 | 4,5 | 14 | 8 | 25 | 8 |
| Число баллонов в одном блоке | 2 | 2 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| Наружный диаметр и толщина стенки баллона, *мм* | 140×15 | 219×22 | 377×25 | 219×22 | 377×15 | 377×25 |
| Длина баллона, *мм* | 1400 | 1400 | 1900 | 1400 | 1220 | 1900 |

* Наименьшие давление и количество воздуха на один блок принимаются в зависимости от типа установки: для КЖ—180 *кгс/см²* и 2200 *м³/ч*; КТ-1000—120 *кгс/см²* и 800 *м³/ч*; КГ-300М—75 *кгс/см²* и 400 *м³/ч*.



При температуре 16 °С активный глинозем имеет следующую влагоемкость:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Относительная влажность воздуха, % | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| Влагоемкость сорбента, вес. % | 8 | 11 | 13 | 14 | 15 |

В расчетах влагоемкость активного глинозема принимают равной 3—5%, для силикагеля — 6—8% массы адсорбента, так как нельзя рассчитывать на полное отделение влаги во влагоотделителе и полную регенерацию адсорбента. Кроме того, при поглощении паров воды адсорбент нагревается, и его влагоемкость уменьшается.

В условиях повышенного давления содержание влаги в газе, как уже указывалось, выше, чем это соответствует условиям равновесия водяных паров, насыщающих воздух при данной температуре и нормальном атмосферном давлении.

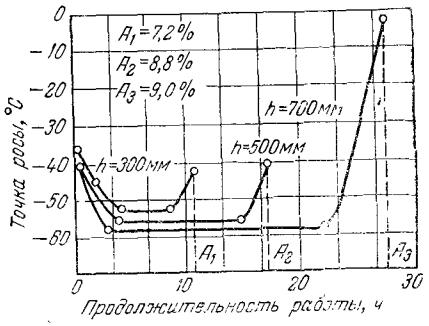



Рис. 7.19. Зависимость процесса осушки воздуха активным глиноземом при скорости 0,2 *дм³/(мин·см²)* и 20°С: *h* — высота слоя адсорбента; *A* — максимальная влагоемкость, % по массе.

Поглощение влаги при прохождении воздуха через слой адсорбента зависит от скорости потока воздуха, его температуры и влажности, высоты слоя адсорбента. Степень осушки ухудшается с повышением температуры и скорости протекания воздуха, а также с уменьшением высоты слоя адсорбента. Наиболее благоприятны условия для осушки воздуха при объемной скорости 0,2 *дм³/(мин·см²)* и температуре 5 °С. Для температуры 20 °С и объемной скорости 0,2 *дм³/(мин·см²)* кривые осушки приведены на рис. 7.19. В расчетах блоков осушки можно принимать равной скорость 0,1 *м/сек* [0,6 *дм³/(мин·см²)*] при подводе воздуха сверху и 0,05 *м/сек* [0,3 *дм³/(мин·см²)*] — при подводе воздуха снизу слоя адсорбента. Кривые на рис. 7.19 показывают, что продолжительность работы адсорбента до проскока влаги зависит от высоты его слоя.

Особенно сильно степень осушки зависит от температуры воздуха перед блоком осушки. Например, при скорости 0,2 *дм³/(мин·см²)* и высоте слоя адсорбента 700 *мм* повышение температуры воздуха с 20 до 50 °С сокращает продолжительность работы адсорбента на 30%, снижает влагоемкость с 9 до 6,2%, а влагосодержание в осушенном воздухе увеличивается с 0,01 до 0,05 *г/м³*. Поэтому при осушке адсорбентами необходимо стремиться поддерживать возможно более низкую температуру воздуха перед блоком осушки; при температуре 30 °С и выше резко

снижается эффективность осушки. Работа блока осушки при температуре поступающего воздуха 50 °С недопустима.

Для практических условий, с учетом возможного загрязнения адсорбента маслом и ухудшения охлаждения воздуха перед блоком осушки, слой адсорбента в баллоне имеет высоту 800—1100 *мм*, что гарантирует нормальную работу осушителя в течение 8 *ч*; после чего адсорбент подвергается регенерации.

Количество адсорбента выбирается с учетом времени полной регенерации его в другом баллоне и охлаждения до первоначальной температуры.

Основным условием нормальной осушки воздуха адсорбентом является тщательное отделение из воздуха капелек влаги и масла; адсорбент способен задерживать также пары масла или газообразные продукты его крекинга.

**Пример.** Блок осушки должен пропустить 780 *м*³/*ч* воздуха при температуре 20 °С и избыточном давлении 30 *кгс/см*². В условиях параллельного включения двух баллонов внутреннего диаметра 327 *мм* объемная скорость воздуха в адсорбере равна 0,5 *дм*³/(*мин·см*²). Примем высоту слоя адсорбента 1600 *мм*. При этом объем адсорбента в двух баллонах составит 266 *дм*³, а его масса 266·0,89 ≈ ≈ 240 *кг*.

Принимая влагоемкость адсорбента 5%, найдем поглощение влаги:

$$0{,}05 \cdot 240 = 12{,}0 \text{ кг}$$

При температуре 20 °С влажность воздуха составляет 17,22 *г/м*³, поэтому за 1 *ч* в адсорбере должно быть поглощено влаги:

$$\frac{17{,}22 \cdot 780}{30 \cdot 1000} = 0{,}45 \text{ кг}$$

Следовательно, время полного насыщения адсорбента:

$$\frac{12}{0{,}45} = 26{,}6 \text{ ч}$$

Принимаем время работы адсорбера 12 *ч*. Тогда степень насыщения адсорбента:

$$\frac{12}{26{,}6} \cdot 100 = 45\% \text{ по массе}$$

Определим, какое количество азота требуется для регенерации адсорбента. Примем, что регенерация должна происходить за 6 *ч*, а остальное время (12—6 = 6 *ч*) достаточно для охлаждения адсорбента после регенерации до температуры 20 °С. Азот выходит из адсорбента при 20 °С и может поглощать те же 17,22 *г/м*³ влаги. За 12 *ч* адсорбент уловит из воздуха влаги:

$$0{,}45 \cdot 12 = 5{,}4 \text{ кг}$$

Чтобы за 6 *ч* удалить всю влагу, часовой расход азота в адсорбере должен равняться:

$$\frac{5{,}4 \cdot 1000}{17{,}22 \cdot 6} = 520 \text{ м}^3/\text{ч}$$

При меньшем расходе азота продолжительность регенерации соответственно увеличивается.



### 7.3.3. Осушка вымораживанием

При понижении температуры воздуха содержание в нем влаги значительно уменьшается. При сильном охлаждении воздуха можно полностью удалить из него влагу. Воздух при осушке вымораживанием пропускают через систему теплообменников, охлаждаемых отходящим азотом и аммиаком.

В азотных теплообменниках воздух охлаждается до температуры не ниже 2 °С. При этом из него выделяется основное количество влаги, которая периодически удаляется продувкой теплообменника. Затем воздух поступает в аммиачные или азотные теплообменники, где охлаждается испаряющимся аммиаком или отходящим из аппарата азотом до температуры минус 40—45 °С. При этой температуре в воздухе остается ничтожное количество влаги.

Обычно ставят два аммиачных или азотных теплообменника, которые работают попеременно: в одном воздух охлаждается, а другой теплообменник в это время отогревается; в процессе отогрева образовавшийся в теплообменнике лед тает и влага удаляется продувкой.

Аммиак ($NH_3$) применяется в качестве хладоагента в аммиачно-холодильных установках. При обычной температуре и давлении аммиак бесцветный газ с очень резким запахом.

Аммиак легче воздуха; плотность его 0,77 *кг/м*³. При охлаждении до —33,4 °С и атмосферном давлении или сжатии свыше избыточного давления 7,5 *кгс/см*² при температуре 15 °С аммиак превращается в жидкость с плотностью 0,64 *кг/дм*³. При испарении из 1 *кг* жидкого аммиака получается 1,316 *м*³ газа (при 0 °С и 760 *мм рт. ст.*). Аммиак ядовит. В смеси с воздухом взрывоопасен; пределы взрываемости в воздухе от 14 до 33%. Жидкий аммиак при попадании на кожу вызывает ожоги.

По ГОСТ 6221—62 аммиак выпускается двух сортов. В качестве хладоагента применяется аммиак 1-го сорта, содержащий не менее 99,9% $NH_3$ и не более 0,1% влаги. Аммиак поставляется в жидком виде в баллонах, рассчитанных на избыточное давление до 35 *кгс/см*². Давление (избыточное) в баллонах в зависимости от температуры составляет 7,5—20 *кгс/см*². Баллон емкостью 40 *дм*³ вмещает около 22,5 *кг* аммиака. Аммиачные баллоны окрашиваются в желтый цвет.

Систему аммиачно-холодильной установки заполняют аммиаком и периодически добавляют его для пополнения утечек через неплотности в арматуре.

В установках с регенераторами влага удаляется из воздуха при его охлаждении и оседает в виде снега и льда на насадке регенераторов. При переключении регенераторов и пропускании через них потоков сухого азота или кислорода в обратном направлении осевшая влага вновь испаряется и выносится из регенератора (см. гл. 8).

## 7.4. КОМПЛЕКСНАЯ ОЧИСТКА ВОЗДУХА ЦЕОЛИТАМИ

Цеолиты* представляют собой кристаллические полигидраты алюмосиликатов натрия и калия, из которых удалена вода. Они имеют большую удельную поверхность пор, составляющую от 750 до 1030 $м^3/г$. Цеолиты обладают большой адсорбционной емкостью в отношении малых концентраций примесей воздуха и сохраняют ее при повышенных температурах, в динамических условиях. Они имеют сродство с молекулами двуокиси углерода, воды, а также избирательно адсорбируют ненасыщенные углеводороды, например ацетилен. Хорошо поглощают вещества, молекулы которых имеют критический диаметр меньше эффективных диаметров окон, соединяющих между собою поры цеолита. Этим обусловлено их молекулярно-ситовое действие, отчего они получили также название молекулярные сита.

В современных воздухоразделительных установках цеолиты используют для комплексной очистки перерабатываемого воздуха от двуокиси углерода, паров воды, ацетилена и других углеводородов. Очистка осуществляется в одном блоке, имеющем два переключаемых адсорбера, и протекает с высокой степенью эффективности. Это позволяет сократить габариты установки за счет воздухоочистительной аппаратуры, значительно удлинить рабочую кампанию, снизить удельный расход энергии и улучшить все технико-экономические показатели установок. Одновременно повышается надежность и безопасность работы установки, упрощается и облегчается процесс ее обслуживания.

В СССР выпускаются по МРТУ-6 01-906—66 синтетические цеолиты типа А (марок NaA и CaA) и типа X (марки NaX), отличающиеся размером окон, которые для цеолита NaA равны около 4 Å, для NaX — около 9 Å.

Поглощающая способность (коэффициент адсорбции) цеолитами паров воды, двуокиси углерода и ацетилена различна; она наименьшая для $CO_2$. Поэтому длительность цикла очистки воздуха и размеры адсорберов при использовании цеолитов определяются степенью очистки воздуха от двуокиси углерода. Исследования показали**, что для очистки воздуха в воздухоразделительных установках наиболее пригоден цеолит NaX (в зернах диаметром 4 *мм*), который и используется в блоках комплексной очистки. При исследованиях была принята высота слоя адсорбента 1500 *мм*; температура поступающего воздуха 20 °C*; объемная скорость воздуха через адсорбент в рабочих условиях 0,05—0,5 $л/(мин \cdot см^2)$. Время защитного действия равнялось 10—20 *ч*. Достигнута осушка воздуха до точки росы —70 °C, очистка от двуокиси углерода — до остаточного содержания $CO_2$ 0,5—1,5 $см^3/м^3$ и практически полная очистка воздуха от углеводородов (ацетилена и др.)**. Процесс регенерации продолжается от 2 до 5 *ч* и производится очищенным воздухом или азотом при температуре: на входе в блок очистки 450 °C и на выходе из блока очистки — в начале регенерации (удаление влаги) 360—380 °C, в конце регенерации (удаление $CO_2$ и углеводородов) 220 °C. Десорбция $CO_2$ практически заканчивается при температуре адсорбента 160 °C в середине слоя и 80 °C на выходе из блока очистки. Для полной десорбции влаги цеолит необходимо нагреть до температуры не менее 300 °C. Скорость газа при десорбции не более 4,5 $л/(мин \cdot см^2)$.

На рис. 7.20 приведены изотермы адсорбции водяного пара из воздуха цеолитом 5А при $p_{абс} = 1$ $кгс/см^2$ и 20 °C; для сравнения показана адсорбция влаги и другими адсорбентами. Как видно из кривых, цеолит обладает наибольшей влагоемкостью и обеспечивает максимальную степень осушки воздуха.

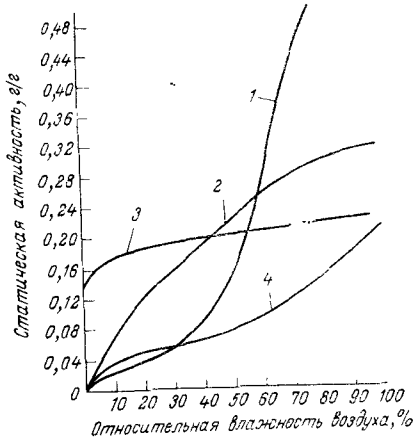



Рис. 7.20. Изотермы адсорбции водяного пара различными адсорбентами при 20 °C:

*1* — силикагель КСК; *2* — силикагель КСМ; *3* — цеолит 5А; *4* — активный глинозем.

По уменьшению степени поглощения цеолитами углеводороды можно расположить в следующий ряд: бутилен, ацетилен, пропилен и этилен. Сорбционная емкость цеолита NaX в отношении углеводородов значительно возрастает при понижении температуры с 20 до 10 °C. Присутствие в воздухе $CO_2$ снижает адсорбцию углеводородов из воздуха. При содержании $CO_2$, равном 0,03%, поглощение углеводородов снижается почти в 2 раза. Различные углеводороды до давлений 30—

---

* Цеолит — от греческого «цео» — кипеть и «литос» — камень; пропитанные влагой цеолиты при нагревании интенсивно выделяют воду и пар, т. е. как будто «кипят».

** Н. Ф. Катина, А. И. Мороз, Е. В. Вагин, Адсорбционная очистка воздуха синтетическими цеолитами, Труды ВНИИКИМАШ, вып. 10, изд. «Машиностроение», 1965.

* Температура воздуха перед блоком очистки держится практически не выше 8—10 °C для того, чтобы преждевременно не срабатывать адсорбент в результате поглощения им большого количества водяных паров.

** Концентрация ацетилена, пропилена, бутана и других более тяжелых углеводородов за блоком очистки была ниже 0,005 $см^3/м^3$ воздуха при исходной концентрации их до 1 $см^3/м^3$. Этан, этилен, пропан и бутан появляются в воздухе за слоем цеолита несколько ранее момента переключения адсорбера, но они менее опасны для блока разделения воздуха, так как хорошо растворяются в жидком кислороде и не выделяются из него в твердом виде.

Таблица 7.5. **Характеристика блоков очистки и осушки воздуха цеолитами**

| № базы | Номинальная производительность при нормальных условиях, $м^3/ч$ | Блок | Рабочее давление, $кгс/см^2$ | | Размеры баллонов, *мм* | | Число баллонов, шт. | Регенерирующий газ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | максимальное | минимальное | наружный диаметр | длина | | расход*, $м^3/ч$ | вид газа |
| I | 120 | ЦБ-120/200 | 200 | 100 | 325 | 1380 | 2 | 70/90 | Азот, воздух или воздух, обогащенный кислородом до 26% $O_2$ |
| II | 400 | ЦБ-400/200 | 200 | 100 | 377 | 1970 | 2 | 100/130 | То же |
| III | 1000 | ЦБ-1000/70 | 70 | 35 | 530 | 3000 | 2 | 140/300 | Отбросный газ, обогащенный кислородом до 70% $O_2$ |
| III | 1000 | ЦБ-1000/200 | 200 | 100 | 465 | 3790 | 2 | 250/350 | Азот, воздух или воздух, обогащенный кислородом до 26% $O_2$ |
| IV | 2400 | ЦБ-2400/70 | 70 | 35 | 750 | 4200 | 2 | 500/700 | Отбросный газ, обогащенный кислородом до 70% $O_2$ |
| IV | 2400 | ЦБ-2400/200 | 200 | 100 | 465 | 3790 | 6 | 500/600 | Азот, воздух или воздух, обогащенный кислородом до 26% $O_2$ |

* Числитель—при десорбции, знаменатель—при охлаждении.

40 $кгс/см^2$ (3—4 $Мн/м^2$) поглощаются цеолитами независимо друг от друга; при более высоких давлениях становится заметным взаимное влияние углеводородов на их адсорбцию цеолитом NaX. В процессе десорбции выделяются полностью: этилен и пропан при 20 °С; бутан — при 40 °С; пропилен — в пределах 35—50 °С; бутилен — в пределах 45—80 °С; ацетилен — от 40 до 70 °С. Таким образом, углеводороды десорбируются из цеолита раньше, чем двуокись углерода и влага.

Для промышленного применения разработан ряд типовых блоков очистки и осушки воздуха цеолитами (табл. 7.5).

Ниже приводится режим работы типовых блоков очистки воздуха цеолитами:

| | |
|---|---|
| Температура, °С | |
| поступающего на очистку воздуха | 5—10 |
| греющего газа, не ниже | 300 |
| газа на выходе при окончании десорбции | 200—220 |
| адсорбента после охлаждения, не выше | 30 |
| Продолжительность работы до десорбции, *ч* | 12 |
| Скорость газа при рабочих условиях, отнесенная к полному сечению баллона, $л/(мин \cdot см^2)$ | |
| при адсорбции | 0,05—0,5 |
| при десорбции (регенерации), не более | 4,5 |

В целях экономии расхода чистого газа, используемого для регенерации цеолитов в блоках комплексной очистки воздуха, ВНИИкриогенмаш рекомендует метод циркуляционной регенерации цеолитов. В этом случае нагретый в подогревателе азот, пройдя адсорбер, не выбрасывается в атмосферу, а сжимается газодувкой и возвращается на регенерацию адсорбента. В период наиболее интенсивного выноса влаги из блока очистки часть газа выбрасывается в атмосферу (так называемый отдув), а вместо него подводится газ, отбираемый после теплообменника.

Способ циркуляционной регенерации уменьшает на 70% расход регенерирующего газа, не сокращая периода работы блока после регенерации адсорбента и не понижая его активности в отношении двуокиси углерода.

Блок цеолитовой очистки воздуха высокого давления для установки КжАж-0,04 показан на рис. 7.21 (см. Приложение). На рис. 7.22 даны схемы типовых блоков конструкции ВНИИкриогенмаш. В блоках по схеме *I* применяют двугорлые бесшовные баллоны из углеродистой стали, по ГОСТ 9731—61. Поток регенерирующего газа в них направляется снизу вверх. Эта схема используется для блоков высокого давления (200 $кгс/см^2$). В схеме *II* используют сварные баллоны из нержавеющей стали Х18Н9Т и поток регенерирующего газа вводится в середину баллона. Схема *II* рекомендуется для установок среднего давления (70 $кгс/см^2$). Регенерирующий газ в блоках по схеме *II*, используемых в азотных установках, содержит до 70% $O_2$, поэтому вся арматура и трубопроводы на линии регенерации делаются также из нержавеющей стали.

Перевод типовых блоков адсорбционной осушки на комплексную очистку и осушку воздуха цеолитами путем замены в них силикагеля или активного глинозема цеолитами невозможен, так как размеры адсорберов при комплексной очистке и осушке воздуха цеолитами значительно больше, чем адсорберов в блоках осушки. Это обусловлено тем, что при цеолитовой очистке фактором, определяющим размеры блока и режим его работы, является адсорбционная способность цеолитов по отношению к двуокиси углерода, в то время как блоки осушки рассчитаны только на поглощение влаги из воздуха.

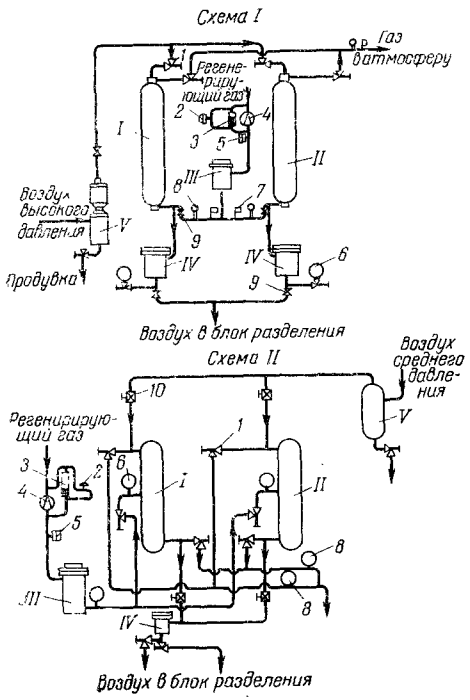



Рис. 7.22. Схемы блоков очистки и осушки воздуха цеолитами:

I — левый адсорбер; II — правый адсорбер; III — электроподогреватель; IV — фильтр; V — влагоотделитель; *1* — запорный угловой вентиль; *2* — реле перепада; *3* — дифманометр; *4* — диафрагма; *5* — предохранительная мембрана; *6* — манометр; *7* — терморегулятор; *8* — электроконтактный термометр (для стационарных установок); *9* — обратный клапан; *10* — клиновая задвижка.

Для переоборудования действующих установок со щелочной очистки воздуха от $CO_2$ и осушкой активным глиноземом на комплексную очистку и осушку воздуха цеолитами выпускаются специальные установки типа КО, включаемые в технологическую схему действующей воздухоразделительной установки. Техническая характеристика установок типа КО, выпускаемых Одесским заводом «Автогенмаш», приведена ниже:

| | КО-960/70 | КО-1080/200 |
|---|---|---|
| Воздухоразделительная установка | Среднего давления | Высокого давления |
| Количество воздуха, *нм³/ч* | 780—960 | 1080 |
| Рабочее давление, *кгс/см²* | 30—70 | 200 |
| Температура воздуха, °С | | |
| поступающего в установку | до 40 | до 40 |
| после блока предварительного охлаждения | 5—8 | 5—8 |
| после блока очистки | 7—10 | 7—10 |
| Достигаемая осушка (точка росы), °С | —70 | —70 |
| Содержание $CO_2$ после очистки, *см³/м³* | 1,5 | 2,0 |
| Установленная мощность, *квт* | 26,5 | 41,5 |



| | | |
|---|---|---|
| Напряжение, *в* | 220/380 | 220/380 |
| Габариты, *мм* | | |
| блока предварительного охлаждения | 1190×1160×2150 | 1190×1160×2050 |
| блока очистки | 1820×1700×3550 | 2000×1900×5000 |
| Общий вес, *Т* | 6,7 | 9,8 |

Установка КО состоит из блока предварительного охлаждения ОФ и цеолитового блока очистки и осушки воздуха. Схема блока предварительного охлаждения дана на рис. 7.23. На этом рисунке

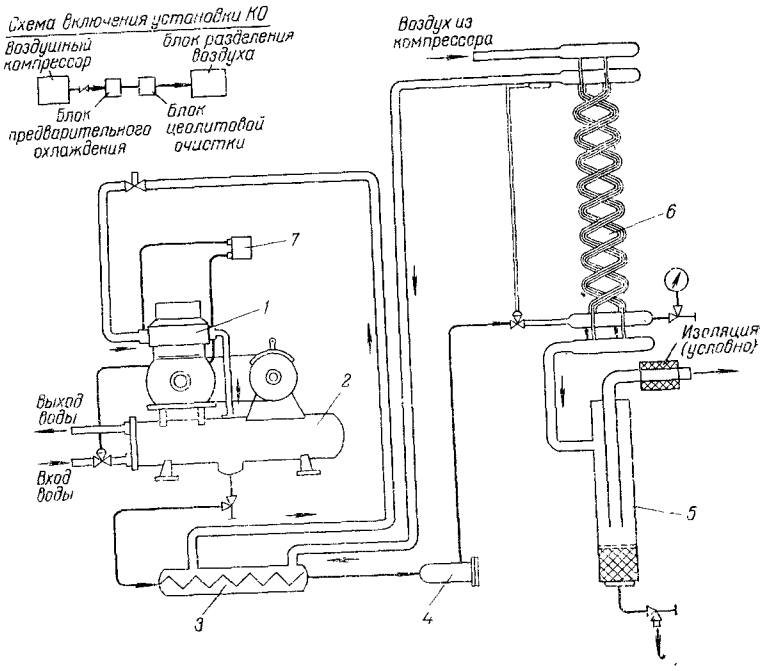



Рис. 7.23. Схема блока предварительного охлаждения воздуха ОФ-960/70.

*1* — конденсаторный агрегат-компрессор; *2* — теплообменник; *3* — фреоновый осушитель; *4* — фильтр; *5* — влагоотделитель; *6* — теплообменник-испаритель; *7* — терморегулятор.

приведена также схема включения установки КО между компрессором и блоком разделения воздуха. В блоке предварительного охлаждения используется фреоновый холодильный агрегат АКФВ-6.

Перевод действующих воздухоразделительных установок на цеолитовую очистку и осушку воздуха упрощает схему установки, повышает безопасность и надежность ее работы, снижает стоимость продуктов разделения воздуха; отпадает необходимость в применении едкого натра; снижается расход воды и электроэнергии,

упрощается обслуживание установки и облегчается работа обслуживающего персонала; освобождается помещение скрубберного и щелочного отделений цеха.

## 7.5. ОСУШКА КИСЛОРОДА

Сжатый кислород может быть насыщен парами воды, если цилиндры кислородных компрессоров смазываются дистиллированной водой, иногда с примесью до 10% глицерина. Поэтому такой кислород перед наполнением им баллонов и подачей по трубопроводу необходимо осушать.

Адсорбционную осушку кислорода проводят в блоках осушки ОК-300 и ОК-600 конструкции машиностроительного завода им. 40-летия Октября. Устройство их такое же, как и блоков для адсорбционной осушки воздуха. В блоке осушки ОК-600 сжатый кислород подается в змеевик холодильника и, пройдя влагоотделители, поступает в один из адсорберов блока осушки. Избыточное давление в адсорберах поддерживается в пределах 100—165 *кгс/см²* с помощью регулятора давления. Отбросный сухой азот из воздухоразделительного аппарата используется для регенерации адсорбента и добавочного охлаждения воды в холодильнике блока осушки.

В блоках осушки кислорода (в отличие от блока осушки воздуха) кислородная арматура и кислородные трубопроводы изготовляются из латуни для предупреждения их коррозии и загорания в среде сжатого кислорода.

Конструкция нижних азотных вентилей такова, что исключает попадание кислорода в азотный трубопровод и электроподогреватель азота. Техническая характеристика блоков осушки кислорода ОК-300 и ОК-600 приводится ниже:

| | ОК-300 | ОК-600 |
|---|---|---|
| Пропускная способность, *м³/ч* | 300 | 600 |
| Избыточное давление кислорода, *кгс/см²* | 100—165 | 100—165 |
| Расчетная продолжительность процесса адсорбции, *ч* | 8 | 12 |
| Гарантируемая точка росы водяного пара, °С | —50 | —50 |
| Расход азота на регенерацию адсорбента, *м³/ч* | 35—45 | 40—50 |
| Сопротивление при прохождении азота через блок осушки, *кгс/см²* | — | 0,2—0,35 |
| Мощность электроподогревателя, *квт* | 4,7 | 4,8 |
| Напряжение на клеммах электроподогревателя, *в* | 220 | 380 |
| Температура кислорода, поступающего в блок осушки после холодильника, °С | 25 | 25 |

## 7.6. ЭКСПЛУАТАЦИЯ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ОСУШКИ

Масловлагоотделители, смонтированные на воздухопроводах кислородной установки, следует регулярно продувать, приоткрывая 2—3 раза на очень короткое время (1—2 *сек*) продувочный вентиль, имеющийся на каждом влагоотделителе. Обычно продувку производят один раз в час.



Обслуживание блоков адсорбционной осушки воздуха заключается в периодическом переключении баллонов для регенерации адсорбента. Переключение производят через каждые 8—12 *ч* в следующем порядке. Сначала прекращают подачу в блок осушки холодного азота. На баллоне, в котором закончилась регенерация адсорбента, слегка открывают вентиль впуска воздуха высокого давления и создают в баллоне давление, равное рабочему давлению.

После этого вентиль впуска воздуха открывают полностью и включают оба баллона на параллельную работу. Ранее работавший баллон отключают и, слегка открыв на нем вентиль для выпуска воздуха, медленно понижают давление до атмосферного. Затем в этот баллон подают азот из подогревателя и проводят регенерацию адсорбента.

Для нормальной работы блока осушки необходимо обеспечить полную герметичность арматуры и вентилей, поэтому при обнаружении пропуска вентилей их следует отремонтировать или заменить новыми.

Для предохранения адсорбента от преждевременного истирания нельзя допускать работу блока на давлении воздуха ниже предусмотренного в паспорте (при понижении давления увеличивается объем проходящего через блок воздуха и возрастает скорость в слое адсорбента). Это следует особенно учитывать при отогреве воздухоразделительного аппарата. Переключать вентили блока осушки нужно медленно в течение 10—20 *мин*, постепенно снижая давление потока воздуха в отключаемом баллоне и также постепенно повышая его во включаемом. Скорость повышения и снижения давления в блоке не должна превышать 8—10 *кгс/см²* в минуту. Собственно регенерация адсорбента продолжается 3—4 *ч*.

Во время регенерации необходимо следить за температурой и расходом азота, подаваемого в блок осушки, и поддерживать их в пределах, установленных регламентом, руководствуясь показаниями термометра на выходе азота из подогревателя и дифманометра. Необходимо поддерживать достаточную температуру регенерирующего азота при входе в блок; если температура азота ниже 250 °С (для активного глинозема), то значительно увеличивается время регенерации адсорбента. При понижении этой температуры ниже 200 °С процесс регенерации протекает не полностью и блок осушки становится неработоспособным.

Регенерацию адсорбента можно производить и неосушенным воздухом, нагретым до указанных выше температур, при которых он может поглощать значительное количество водяных паров, так как с повышением температуры пределы насыщения воздуха парами воды резко возрастают.

Процесс десорбции влаги из адсорбента сопровождается поглощением тепла, поэтому температура влажного азота, выходящего из адсорбера, не повышается более 40—50 °С.

Об окончании процесса регенерации судят по температуре азота, выходящего из блока осушки. К концу процесса регенерации температура быстро повышается до 75—85 °С и остается затем почти постоянной. Если температура азота на выходе из блока осушки превышает указанную величину, подвод тока к подогревателю азота следует прекратить.

По окончании регенерации через блок осушки продолжают пропускать еще в течение нескольких часов неподогретый азот для постепенного охлаждения адсорбента до 10—20 °С, так как температура его должна быть не ниже 2° и не выше 30 °С. При температуре ниже 2 °С на адсорбенте будет вымерзать влага и он быстро забьется льдом; при температуре выше 30 °С способность адсорбента удерживать влагу резко ухудшается.

Масловлагоотделитель, находящийся перед блоком осушки, следует продувать не реже одного раза в час. Адсорбент, засыпанный в этот масловлагоотделитель, насыщается каплями масла, и поэтому его необходимо периодически (через 6—12 месяцев) заменять свежим (если он на 60—70% высоты слоя окажется загрязненным маслом и примет коричневатую окраску).

Активный глинозем в адсорберах блоков осушки должен заменяться новым в том случае, когда его влагопоглотительная способность снизилась более чем на 20% и он загрязнен маслом.

Для проверки состояния адсорбента баллоны вскрывают один раз в год при капитальном ремонте установки. Если при этом обнаружится, что адсорбент измельчен и частично унесен воздухом или загрязнен маслом, следует добавить свежего адсорбента или полностью заменить его. Масло с сеток фильтра удаляют растворителем.

Истирание и унос адсорбента из блока осушки при правильной эксплуатации составляет для активного глинозема 5—7% в год. В условиях нормальной эксплуатации блок осушки с активным глиноземом может работать без замены адсорбента в течение 2—3 лет.

Необходимо всегда стремиться к тому, чтобы температура воздуха перед блоком осушки была по возможности низкой (но не ниже 2°) и не превышала 30 °С. Для поддержания низкой температуры поступающего на осушку воздуха нужно следить за правильной работой воздухоохлаждающих устройств после последней ступени компрессора; это особенно необходимо в летние месяцы. В летнее время, когда температура охлаждающей воды высокая, воздух перед блоком осушки также имеет более высокую температуру и соответственно повышенное влагосодержание. Время же защитного действия адсорбента в этих условиях сокращается, так как при повышенной температуре влагоемкость адсорбента уменьшается.

В блоках комплексной очистки и осушки воздуха цеолитами необходимо точно соблюдать установленный инструкцией режим регенерации адсорбента. Особое внимание следует уделять контролю расхода греющего газа и температуры регенерации.

ГЛАВА 8

# АППАРАТУРА БЛОКОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА*

## 8.1. ТЕПЛООБМЕННИКИ

Теплообменники служат для передачи теплоты от одного потока газа (жидкости) к другому; при этом один поток вещества охлаждается, а другой нагревается. Передача теплоты в теплообменниках происходит через стенки, разделяющие потоки. Такие теплообменные аппараты называются *рекуперативными* в отличие от *регенеративных*, где теплота передается за счет аккумулирования ее насадкой, попеременно омываемой потоками теплообменивающихся газов (см. разд. 8.2). Принципиальные схемы теплообменников приведены на рис. 8.1.

В воздухоразделительных установках используются обычно следующие виды теплообменников: прямотрубные, с витыми трубками и пластинчатые. Применяются как односекционные, так и многосекционные теплообменники; последние используются для нагревания и охлаждения нескольких потоков газов или жидкостей.

Выбор типа и конструкции теплообменника определяется давлением, температурой, тепловой нагрузкой и свойствами газов (жидкостей), а также технико-экономическими показателями, учитывающими условия работы аппарата и стоимость материалов.

Прямотрубные кожухотрубные теплообменники используются в качестве подогревателей азота, детандерных теплообменников, подогревателей греющего воздуха, вымораживателей влаги и двуокиси углерода. Для улучшения теплоотдачи в межтрубном пространстве делаются поперечные перегородки. В кожухотрубных теплообменниках с гладкими трубками на 1 $м^3$ трубчатки приходится 250—275 $м^2$ теплообменной поверхности.

Теплообменники с витыми трубками наиболее распространены в воздухоразделительных установках и используются для охлаждения воздуха высокого и среднего давления, а также для переохлаждения или испарения сжиженных газов; они также могут быть многосекционными. Широко применяются витые теплообменники с шаговой навивкой трубок.

* Конструктивные данные по новым крупным установкам, приведенные в настоящей главе, предоставлены автору В. Д. Никиткиным и Х. Я. Степом.

В трубчатых теплообменниках газ с более высоким давлением обычно проходит внутри трубок, а с более низким давлением — между трубками*. Для лучшей передачи тепла трубки в боль-

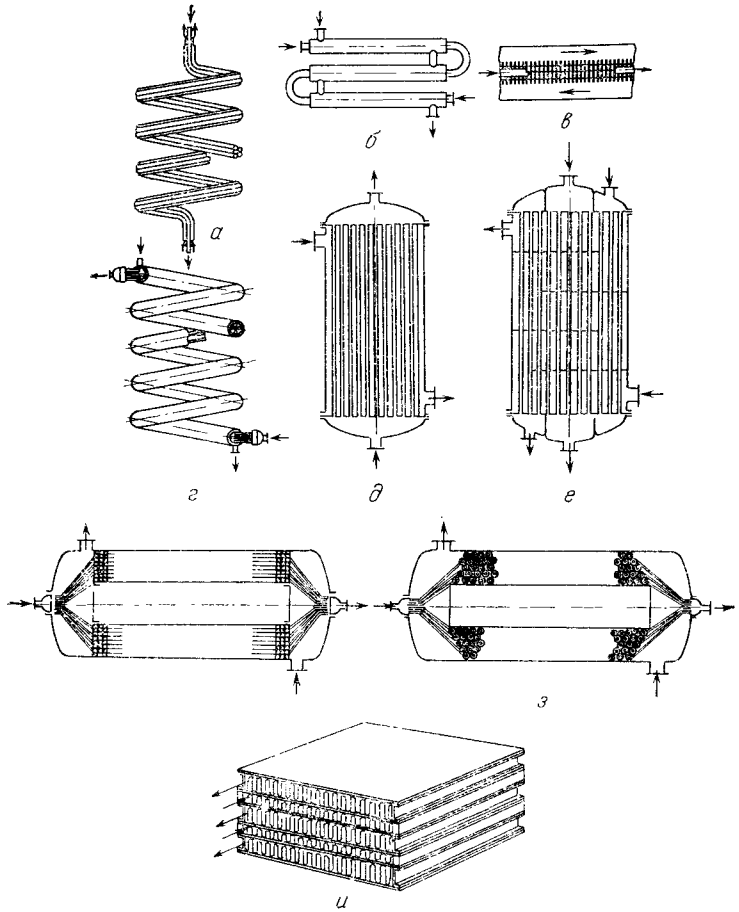



Рис. 8.1. Принципиальные схемы теплообменников:

*а* — из спаянных гладких трубок; *б* — типа «труба в трубе»; *в* — из ребристых трубок, с продольным обтеканием; *г* — змеевиковый; *д* — кожухотрубный односекционный, с прямыми трубками; *е* — кожухотрубный двухсекционный, с прямыми трубками и поперечными перегородками; *ж* — поперечноточный витой из гладких трубок; *з* — поперечноточный витой из ребристых трубок; *и* — пластинчатый.

шинстве теплообменников располагают так, чтобы омывающий поток газа шел перпендикулярно трубкам. Такие теплообменники называются *поперечноточными*.

* Исключение составляют длиннотрубные (обращенные) и витые конденсаторы, а также змеевики для отбора чистых продуктов в регенераторах с насыпной насадкой.



Для трубчатых теплообменников применяют трубки из меди, нержавеющей стали и алюминиевых сплавов.

Значительное увеличение коэффициента теплопередачи достигается использованием ребристых трубок. Оребрение трубок производят накаткой в процессе их изготовления. Можно выдавливать ребра у трубок на токарном станке с помощью специального приспособления. Ребро имеет сечение треугольника, вытянутого вверх (на 1 *пог. м* трубы располагается 400—600 спиральных ребер). В результате повышения коэффициента теплопередачи и увеличения на 20—60% поверхности теплообмена масса металла оребренных трубок получается на 35—50% меньше, чем при гладких трубках. На 1 $м^3$ трубчатки из оребренных труб приходится от 600 до 800 $м^2$ теплообменной поверхности (с учетом обеих сторон труб). В качестве оребренных используют трубы из меди или алюминиевых сплавов.

Применение сплавов алюминия для изготовления витых теплообменников снижает металлоемкость и затраты на материал; использование оребрения труб позволяет создавать более компактные аппараты. Стоимость материала для витого теплообменника, приходящаяся на 1 $м^2$ поверхности теплообмена, в 10 раз ниже, чем для прямотрубного. По сравнению с теплообменниками из нержавеющих сталей затраты на материал для алюминиевых теплообменников снижаются примерно в 3 раза.

Пластинчатые теплообменники применяются в тех случаях, когда коэффициенты теплоотдачи на обеих сторонах теплообменной поверхности сравнительно невелики и близки друг к другу. Они отличаются большой компактностью, малым весом, низкой теплоемкостью, высоким коэффициентом теплопередачи и незначительным гидравлическим сопротивлением*. В пластинчатых теплообменниках в 1 $м^3$ пакета размещается до 1000 $м^2$ теплообменной поверхности.

Для одинаковых условий теплопередачи и тепловой нагрузки пластинчатые теплообменники по сравнению с кожухотрубными (типов *д* и *е*, рис. 8.1) имеют в 3—6 раз меньший объем и весят в 4—8 раз меньше. По сравнению с поперечноточными витыми (типов *ж* и *з*) пластинчатые теплообменники для равных условий получаются такого же объема, но в 3—4 раза легче. Пластинчатые теплообменники используют вместо регенераторов в установках низкого давления, конденсаторов, вымораживателей двуокиси углерода.

Пластинчатый теплообменник представляет собой пакет из большого числа параллельно расположенных гофрированных тон-

* В воздухоразделительных установках пластинчатые теплообменники впервые были применены П. Л. Капицей для вымораживания двуокиси углерода из перерабатываемого воздуха.

Для установок производительностью 10 000 $м^3/ч$ технологического кислорода фирма «Линде» также применяет пластинчатые конденсаторы из алюминия.

ких пластин, снабженных обвязкой из жесткого каркаса. Пространство между парой пластин является каналом для прохода газов, присоединяемым к соответствующему коллектору. Ребра гофрированных пластин припаяны по всей длине к плоским промежуточным пластинам в местах их соприкасания, образуя жесткую конструкцию пакета. Для интенсификации теплообмена в гофрах делаются прорези различной формы. Такой теплообменник является эффективным и компактным аппаратом.

Пластинчатые теплообменники позволяют отводить из воздухоразделительного аппарата чистые продукты разделения воздуха (кислород, азот) и одновременно выполняют функцию вымораживателей (из воздуха прямого потока вымораживают пары воды и двуокись углерода). В этом отношении они заменяют регенераторы с насыпной насадкой и встроенными змеевиками (см. ниже), являясь значительно более компактными и дешевыми теплообменными аппаратами. При их применении упрощается схема установки разделения воздуха. Широкое внедрение пластинчатых теплообменников является одним из важных направлений развития кислородного машино- и аппаратостроения.

Изготовляют пластинчатые теплообменники из нержавеющей стали Х18Н10Т или алюминиевых сплавов с применением пайки. Теплообменник из стали Х18Н10Т состоит из тонких гофров, разделительных пластин толщиной 0,1 *мм* и фиксаторов. Все элементы соединяются медным припоем, содержащим до 10% никеля. Предварительно на разделительную пластину гальваническим путем наносят подслой из никеля толщиной 2—3 *мкм* и слой меди до 30 *мкм*. Пайку ведут в стальном контейнере, в среде проточного аргона, в качестве флюса применяют фтористый бор. Для улучшения качества пайки предварительному омеднению подвергают все спаиваемые поверхности.

При изготовлении пластинчатых теплообменников из алюминия применяют сплав АМц в виде пластин толщиной 0,2—0,3 *мм*. Разделительные пластины плакируют силумином, который является припоем. Собранный в приспособлении пакет теплообменника подогревают в печи, после чего погружают в ванну с расплавленными флюсующими солями, которые проникают в зазоры и флюсуют поверхности, обеспечивая их спаивание. Коллекторы к пакету приваривают аргоно-дуговой сваркой. Наилучшими (по данным ВНИИкриогенмаш) для воздухоразделительных аппаратов оказались пластинчатые теплообменники с прерывистыми ребрами и малым расстоянием между прорезями, равным 1,5 *мм*.

Рассмотрим некоторые конструкции теплообменников воздухоразделительных установок.

Поперечноточный витой **трубчатый теплообменник установки** УКГС-100 производительностью 115 *м*³/*ч* кислорода показан на рис. 8.2. Охлаждаемый в теплообменнике сжатый воздух поступает через коллекторы *2* и *3*, в решетки которых впаяны концы медных трубок теплообменника. Нагреваемые азот и кислород



движутся раздельно навстречу воздуху между трубками: кислород — по кислородной секции, азот — по азотной. Трубки азотной секции *4* намотаны на сердечник *1* в десять рядов; между рядами трубок находятся прокладки из латунных полосок. Наружная обечайка *8* азотной секции служит сердечником для кислородной секции *9*, которая имеет два ряда трубок.

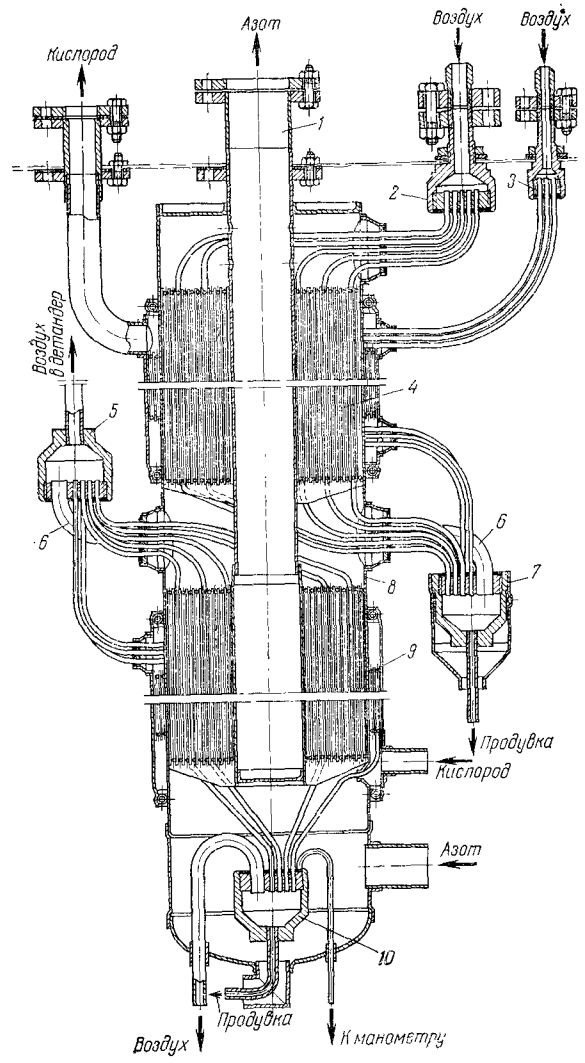



Рис. 8.2. Поперечноточный витой теплообменник установки УКГС-100 из медных трубок:

*1* — сердечник; *2*, *3*, *5*, *7* и *10* — коллекторы; *4* — азотная секция; *6* — труба, соединяющая промежуточные коллекторы; *8* — наружная обечайка; *9* — кислородная секция.

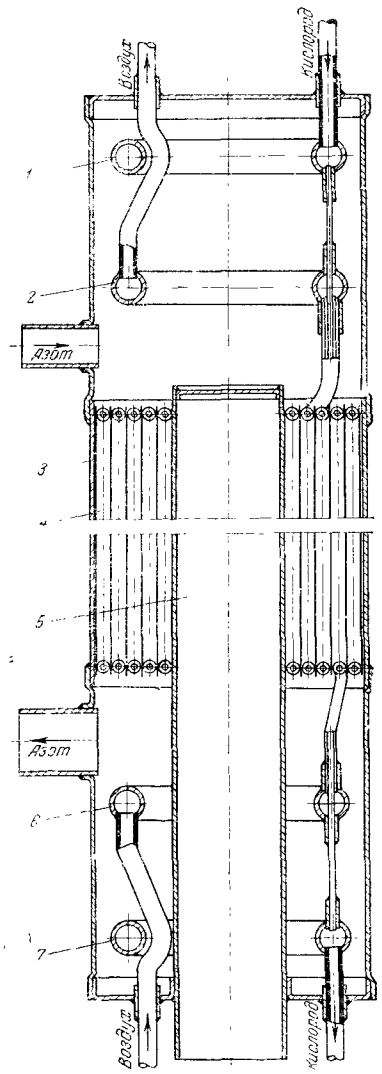



Рис. 8.3. Поперечноточный витой теплообменник установки КГН-30 с кольцевыми коллекторами:

*1* — кислородный холодный коллектор; *2* — воздушный холодный коллектор; *3* — обечайка; *4* — трубки; *5* — сердечник; *6* — воздушный теплый коллектор; *7* — кислородный теплый коллектор.

Намотка трубок выполнена правой и левой — попеременно. Обечайки плотно обжимают трубки. Коллекторы *5* и *7* промежуточные; они служат для разделения теплообменника на две части и отвода от 25 до 45% воздуха из теплообменника в детандер. Коллекторы соединены между собой трубой *6*. Охлажденный воздух выходит из теплообменника через коллектор *10*. Коллекторы *7* и *10* снабжены трубками для продувки.

Для удобства изготовления все соединения обечаек теплообменника выполняются пайкой мягкими припоями ПОС-40 и ПОС-30, содержащими соответственно 40 и 30% олова, остальные — свинец. Пайку трубок высокого давления производят в раструб медно-цинковым твердым припоем ПМЦ-54С, состоящим из 54% меди и 46% цинка.

Максимальное избыточное давление в межтрубном пространстве теплообменника равно 0,7 *кгс/см²* (испытания производят на 1,7 *кгс/см²*). Трубки теплообменника испытывают при гидравлическом давлении, в полтора раза превышающем максимальное рабочее давление.

В правильно намотанном теплообменнике при продувке межтрубного пространства его секций соответствующим количеством воздуха с температурой 20 °С сопротивление должно составлять от 50 до 100 *мм рт. ст.* Для некоторых типов теплообменников допускается сопротивление до 150—200 *мм рт. ст.*

Чтобы вся поверхность трубок использовалась для теплообмена необходимо обеспечить равномерное распределение потока воздуха между всеми трубками. Этого можно достичь при условии равного гидравлического сопротивления трубок



всех витков, т. е. если длина трубок примерно одинакова. С этой целью на чертежах теплообменников даются таблицы навивки трубок с указанием: номера рядов, средних диаметров рядов, числа трубок в заходе, числа витков каждой трубки, длины трубок в навивке и в заготовке, числа прокладок на каждый ряд.

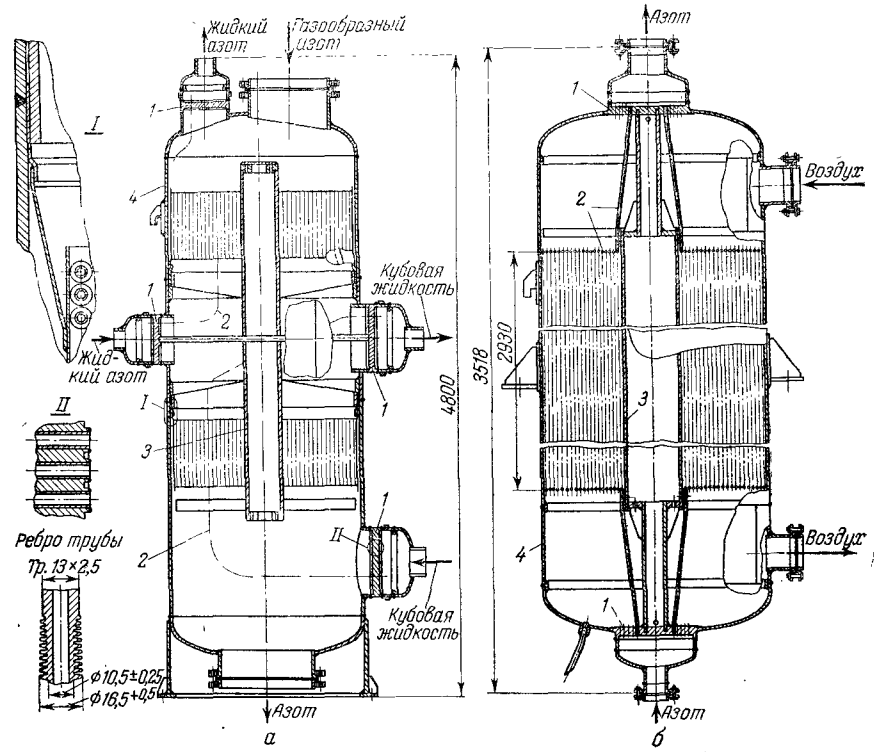



Рис. 8.4. Теплообменники витые поперечноточные:

*а* — из оребренных алюминиевых труб; *б* — из гладких труб нержавеющей стали; *1* — трубные решетки; *2* — трубки; *3* — сердечник; *4* — корпус.

Если трубки теплообменника навиты недостаточно плотно, то скорость воздуха в теплообменнике снижается и теплопередача будет менее интенсивной, что приведет к увеличению разности температур входящего воздуха и отходящих азота и кислорода на теплом конце теплообменника (недорекуперации).

Сопротивление теплообменника при его изготовлении можно подогнать до требуемой величины изменением плотности обжатия трубок внутренней рубашкой. Теплообменник установки КГН-30, разработанный одесским заводом «Автогенмаш», показан на рис. 8.3. Для уменьшения расхода цветного металла применены кольцевые коллекторы из медных труб. В коллекторы вварены муфты соответствующего диаметра и в них впаяны внутренние

и наружные трубки теплообменника. Кислородные трубки для потока сжатого кислорода из кислородного насоса располагаются внутри нескольких воздушных трубок. Коллекторы такого типа легче ремонтировать.

В качестве примера поперечноточного витого теплообменника из оребренных алюминиевых труб на рис. 8.4, *а* показана конструкция переохладителя кубовой жидкости и жидкого азота установки АКт-17-1. Оребренные трубки получают накаткой гладких труб из сплава АМцС или АД-1 размером 13×2,5 *мм;* шаг оребрения 2 *мм,* высота ребер 3 *мм.* Трубки намотаны на сердечник. Концы трубок вварены в решетки аргоно-дуговой сваркой. Этим же способом сварен корпус теплообменника. Материал корпуса и решеток — сплав АМцС. Снаружи трубки плотно обтянуты обечайкой из тонкого листового алюминия. В азотной секции длина трубок 20 *м,* количество 127 шт., в секции кубовой жидкости — длина 7 *м,* число трубок 342 шт. Избыточное давление в трубках 6 *кгс/см²*, в межтрубном пространстве 0,7 *кгс/см²*.

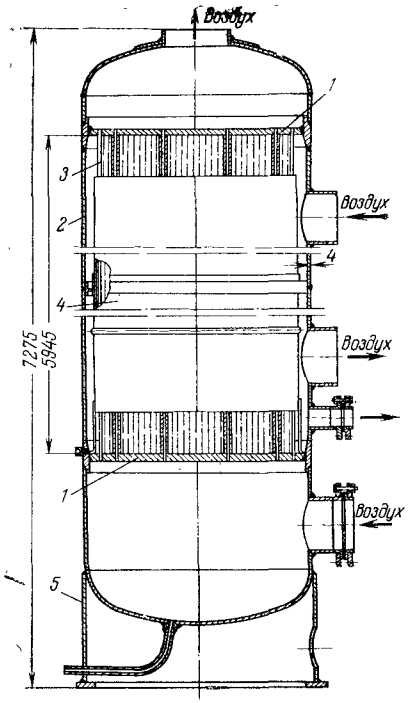



Рис. 8.5. Прямотрубный (кожухотрубный) теплообменник:
*1* — трубные решетки; *2* — трубки; *3* — корпус; *4* — рубашка *5* — опора.

На рис. 8.4, *б* показан теплообменник чистого азота установки КтА-12-2, выполненный поперечноточным, витым из трубок (10×1 *мм*) нержавеющей стали Х18Н10Т. Корпус теплообменника сварной из стали Х18Н10Т или Х14Г14Н3Т. Змеевик многозаходный, многослойный навит на сердечник. Количество трубок 240 шт., длина 34 *м.* Концы трубок вварены в решетки по отбортовке аргоно-дуговой сваркой без присадочного металла. Рабочее избыточное давление в трубках и межтрубном пространстве 6 *кгс/см²*.

Рассмотрим утройство кожухотрубного теплообменника.

Примером конструкции прямотрубного (кожухотрубного) теплообменного аппарата может служить теплообменник-вымораживатель $CO_2$ блока разделения установки АКт-16-1 (рис. 8.5). Он изготовлен из нержавеющей стали Х18Н10Т; трубки 10×1 *мм* длиной около 6000 *мм*; количество трубок 2251 шт. По трубкам проходит воздух в турбодетандер; между трубками, снабженными поперечными перегородками, идет петлевой воздух из регенератора



(температура на входе около —90 °С). Избыточное давление в трубках и межтрубном пространстве около 6 *кгс/см²*.

Поверхность трубок рассчитывают, исходя из количества теплоты, которое должно передаваться через них, по формуле

$$Q = Fk\Delta t \qquad (8.1)$$

где $Q$ — количество передаваемого тепла (тепловая нагрузка), *ккал/ч*;
$F$ — поверхность теплообмена по наружному диаметру трубок, *м²*;
$\Delta t$ — средняя разность температур, *град*;
$k$ — общий коэффициент теплопередачи, *ккал/(м²·ч·град)*.

Коэффициент $k$ для прямотрубных теплообменников равен 30—40 *ккал/(м²·ч·град)*, а для поперечноточных витых — 90—140 *ккал/(м²·ч·град)*.

Если темплоемкости газов остаются постоянными и разности температур $\Delta t_1$ и $\Delta t_2$ теплообменивающихся газов на концах теплообменника отличаются менее чем в 2 раза, то в формуле (8.1) для $\Delta t$ берется средняя арифметическая разность температур. При отношении $\Delta t_1/\Delta t_2 \geqslant 2$ в формулу (8.1) подставляют среднелогарифмическую разность температур. При изменении теплоемкости хотя бы у одного газа расчет теплообменника ведут на среднеинтегральную разность температур.

Скорость газа в трубках теплообменника может изменяться в широких пределах и зависит от давления газа. Обычно эта скорость принимается равной:

| Давление, *кгс/см²* | Скорость, *м/сек* |
|---|---|
| 200 | 3—5 |
| 30—50 | 6—8 |
| 1—6 | 20—25 |

С увеличением скорости газа повышается коэффициент теплопередачи, сокращается число труб и поверхность теплообмена (т. е. габариты и вес теплообменника), но, с другой стороны, увеличивается длина труб, возрастает гидравлическое сопротивление потоку газа, в результате чего повышаются потери давления в теплообменнике и в конечном счете возрастает удельный расход энергии на разделение воздуха.

Скорость газа в межтрубном пространстве для потока при абсолютном давлении 1,2—1,5 *кгс/см²* принимается равной от 5 до 15 *м/сек.* Эта скорость в основном влияет на гидравлическое сопротивление межтрубного пространства теплообменника, от которого зависит давление в верхней колонне и связанное с ним давление в нижней колонне блока разделения.

В каждом теплообменнике обычно принимается запас в 10—30% по отношению к расчетной поверхности теплообмена, учитывая возможность ухудшения теплопередачи вследствие загрязнения трубок, изменения плотности навивки, необходимость заглушать часть трубок при ремонтах и пр.

Таблица 8.1. **Конструктивная характеристика витых теплообменников из красной меди**

| Установки | Тип теплообменника | Избыточное рабочее давление, *кгс/см²* | Поверхность теплообмена, *м²* | Трубки | | | Общий вес, *кгс* | Отношение веса рабочей части трубок к общему весу теплообменника |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | размер, *мм* | количество, шт. | средняя длина одной трубки, *м* | | |
| КГН-30 | Витой | 220 | 9,93 | 5×1,5 и 10×1,5 | 13 | 20,18 | 185 | 0,64 |
| УКГС-100 | » | 50 | 39,5 | 10×1 | 71 | 19,6 | 530 | 0,65 |
| КТ-1000 | » | 220 | 35,6 | 10×1,5 | 40 | 34,5 | 760 | 0,63 |
| КЖ | » | 200 | 158,9 | 10×1,5 | 163 | 38,8 | 3725 | 0,58 |
| БР-5 | Прямотрубный | 6,5 | 89,0 | 10×0,5 | 747 | 4,09 | 1123 | 0,35 |
| БР-1 | | | | | | | | |
| БР-1М | » | 6,5 | 176,6 | 8×0,5 | 1875 | 4,07 | 1750 | 0,45 |
| кислородный | Витой | 6,5 | 235 | 10×1 | 842 | 9 | 3910 | 0,48 |
| азотный | » | 6,5 | 123 | 10×1 | 187 | 21 | 1810 | 0,54 |

Характеристика трубчатых теплообменников для некоторых воздухоразделительных установок приведена в табл. 8.1—8.3.

**Ремонт теплообменников.** Необходимость ремонта теплообменников возникает при разрыве трубок и обечаек, нарушении плотности мест пайки и пр. Из-за разрыва трубок кислородной секции

Таблица 8.2. **Тепловая характеристика прямотрубных теплообменников из красной меди**

| Аппарат | Тепловая нагрузка, *ккал/ч* | Поверхность теплообмена, *м²* | Давление абсолютное, *кгс/см²* | | Входит в установку |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | в трубах | в межтрубном пространстве | |
| Подогреватели | | | | | |
| азота перед регенератором | 90 000—115 000 | 70 | До 6 | 1,7 | Бр-1 |
| воздуха перед турбодетандером | 90 000—115 000 | 190 | До 6 | 6 | » |
| воздуха для отогрева установки | 900 000 1 000 000 | 45 | До 6 | 6 | » |
| Теплообменники | | | | | |
| основные | 40 000—50 000 | 42 | 150—200 | 1,2—1,3 | КТ-1000 |
| | 157 000 | 180 | 150—200 | 1,7 | КЖ-1600 |
| вымораживатель влаги | 95 000 | 60 | 150—200 | 1,1—1,2 | КЖ-1600 |
| Переохладители жидкого воздуха и азота | 53 000—67 000 | 700 | До 6 | До 1,7 | БР-1 |
| | 9 000 | 54 | 5,8 | 1,7 | КТ-1000 |



Таблица 8.3. **Техническая характеристика трубчатых теплообменников из нержавеющей стали 1Х18Н10Т**

| Установки | Назначение | Тип теплообменника | Трубки | | | | Давление, *кгс/см²* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | размер, *мм* | количество, шт. | средняя длина, *м* | поверхность теплообмена, *м²* | в трубках | в межтрубном пространстве |
| Кт-12-2 КтА-12-2 К-11-1 Кт-5-2 | Кислородный теплообменник высокого давления | Витой из гладких труб | 10×1 | 37 | 23 | 24 | 165 | 6 |
| Кт-12-2 КтК-12-1 Кт-5-2 | Азотный теплообменник | То же | 10×1 | 45 | 23 | 28,7 | 6 | 6 |
| Кт-5-2 | Переохладители | » | | | | | | |
| | азотной флегмы | | 10×1 | 182 | 28 | 131 | 6 | 0,7 |
| | кубовой жидкости | | 10×1 | 187 | 16 | 63,5 | 6 | 0,7 |
| | Подогреватель | Прямотрубный | 10×1 | 4584 | 0,66 | 95 | 0,7 | 6 |
| КАр-30 | Переохладитель-подогреватель | Витой из оребренной трубки* | | | | | | |
| | азотной флегмы | | 13×2,5 | 1427 | 12 | 2516 | 6 | 0,7 |
| | кубовой жидкости | | 13×2,5 | 1000 | 10 | 1470 | 6 | 0,7 |
| | подогреватель азота | | 13×2,5 | 396 | 20 | 1260 | 6 | 0,7 |

* Материал — алюминиевый сплав.

снижается концентрация кислорода (определяется анализом). Пропуски в обечайке кислородной секции и в трубках азотной секции приводят к уменьшению производительности аппарата. Нарушения герметичности наружной обечайки выявляются по промерзанию изоляции аппарата.

Пропуски в обечайке устраняют запайкой дефектного места мягким припоем. При разрыве трубки ее заглушают с обоих концов медными пробками и запаивают. В новых теплообменниках допускается заглушать не более 5%, а при ремонте — не более 15% трубок. При большем числе неисправных трубок целесообразно произвести полную перемотку теплообменника или заменить его новым. Сварные теплообменники ремонтируют с применением того же способа сварки, который использовался при их изготовлении.

## 8.2. РЕГЕНЕРАТОРЫ

В воздухоразделительных установках регенераторы выполняют ту же роль, что и теплообменники, т. е. передают тепло от поступающего в воздухоразделительный аппарат воздуха продуктам его разделения, выходящим из аппарата. Но наряду с этим регенера-

торы выполняют и функцию очистки проходящего воздуха от влаги и двуокиси углерода вымораживанием их на насадке.

Регенераторы целесообразно ставить на потоке больших объемов воздуха низкого давления (5—6 *кгс/см²*). Поэтому регенераторы применяют в средних и крупных воздухоразделительных установках, работающих с использованием воздуха низкого давления.

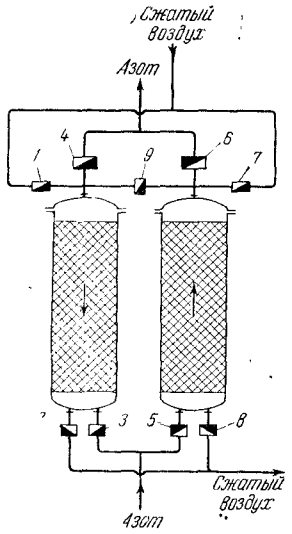



Рис. 8.6. Схема работы двух регенераторов:

*1, 4, 6* и *7* — переключающие клапаны принудительного действия, теплого конца; *2, 3, 5* и *8* — автоматические клапаны холодного конца; *9* — перепускной клапан принудительного действия

Для обеспечения непрерывности процесса разделения воздуха на потоке каждого из обратных газов (кислорода и азота) устанавливают не менее двух регенераторов. Схема их работы показана на рис. 8.6. Если, например, открыты клапаны *1* и *2*, то через левый регенератор проходит поток сжатого воздуха из турбокомпрессора (теплое дутье) и охлаждается при соприкосновении с холодной насадкой.

За период теплого дутья температура проходящего воздуха понижается от плюс 20—30 °С до минус 160—170 °С. Насадка регенератора в это время несколько подогревается и имеет в направлении к холодному концу регенератора отрицательную, а к теплому — положительную температуру. В это же время открыты клапаны *5* и *6*, и через второй (правый) регенератор проходит обратный поток холодного азота (или кислорода), отводимый из воздухоразделительного аппарата. Поток холодного азота охлаждает насадку регенератора и, дойдя до теплого конца регенератора, нагревается до положительной температуры.

Таким образом, насадка регенератора как бы воспринимает «холод» отводимого из аппарата азота, а затем вновь отдает его потоку теплого воздуха. Насадка восстанавливает (регенерирует) холод, накопленный в аппарате, отсюда регенераторы и получили свое название.

Каждый период длится 3—9 *мин*, после чего автоматически переключаются потоки газов в регенераторах: охлаждаемый воздух начинает проходить через правый регенератор, а холодный азот (или кислород) — через левый. Переключение достигается изменением положения клапанов. Во второй период открыты клапаны *7, 8, 3* и *4*. Клапан *9* в момент переключения регенераторов перепускает часть оставшегося сжатого воздуха из одного регенератора в другой, выравнивает в них давление, и потери сжатого воздуха при переключении регенераторов уменьшаются.

Очистка воздуха от влаги и двуокиси углерода достигается в регенераторах следующим образом. При проходе воздуха через



насадку регенератора влага оседает на ней в виде капелек жидкости в той части регенератора, где температура насадки приближается к 0 °С. В виде инея и снега влага высаживается на насадке при температуре от 0° до —60 °С; в этой зоне насадки (I зона) влага из воздуха удаляется почти полностью. Во II зоне, где температура составляет от —60 до —130 °С, остатки влаги высаживаются в виде льда. Вымерзание двуокиси углерода в регенераторах происходит в III зоне при температурах от —130 до —170 °С.

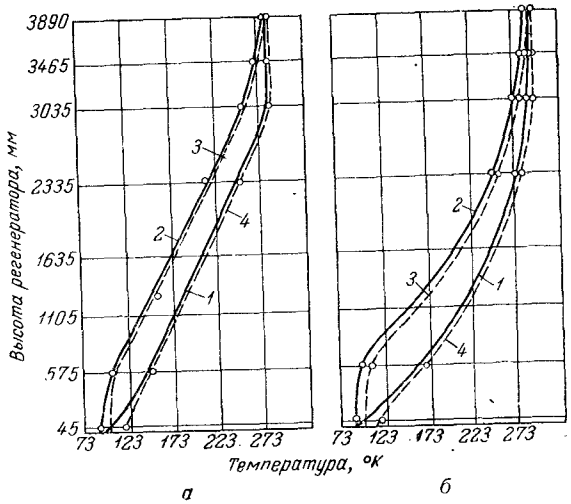



Рис. 8.7. Изменение средней температуры прямого и обратного газовых потоков по высоте регенератора (по опытам В. Ф. Густова):

*а* — соотношение потоков 1,03, абсолютное давление 5,3 *кгс/см²*, расход воздуха 370 *м³/ч*; *б* — соотношение потоков 1,00, абсолютное давление 5,4 *кгс/см²*, расход воздуха 365 *м³/ч*; *1* — начало холодного дутья; *2* — конец холодного дутья; *3* — начало теплого дутья; *4* — конец теплого дутья.

Высаживание $CO_2$ в регенераторах представляет собой сложный процесс и зависит от ряда факторов.

Работами В. Ф. Густова установлено, что кристаллизация двуокиси углерода в регенераторах с алюминиевой насадкой происходит не только на поверхности охлажденной насадки, но и в потоке воздуха и что мельчайшие кристаллы $CO_2$ движутся по каналам насадки вместе с газом. Температура насадки в периоды холодного и теплого дутья в одном и том же сечении изменяется на 35—85 *град* в зависимости от количества проходящего газа и соотношения потоков теплого и холодного дутья (рис. 8.7).

В середине регенераторов средние температуры насадки за периоды теплого и холодного дутья равны между собой. На концах же регенераторов, где температура входящего газа (воздуха, кис-

лорода и азота) постоянна, средние температуры насадки за периоды теплого и холодного дутья различны.

В начале периода теплого дутья воздух соприкасается с насадкой, имеющей наиболее низкую температуру, и поэтому на ней выделяется твердая $CO_2$. В последующем, в период теплого дутья температура насадки несколько повышается, происходит возгонка осевшей твердой двуокиси углерода и унос ее потоком воздуха в более холодные слои насадки, расположенные ближе к холодному концу регенератора.

Например, при высоте алюминиевой насадки 3890 *мм*, отношении обратного и прямого потоков 1,03 и расходе воздуха 460 $м^3/ч$ вымораживание $CO_2$ начинается на расстоянии 1150 *мм* от холодного конца и основная масса двуокиси углерода оседает на нижележащем участке насадки длиной 350—400 *мм*.

При соотношении газовых потоков 1,00 и том же расходе воздуха протяженность более холодных участков насадки уменьшается и вымораживание $CO_2$ начинается на расстоянии всего 860 *мм* от холодного конца регенератора; основная масса углекислоты в этом случае задерживается на нижележащем участке насадки длиной всего 200 *мм*.

Таким образом, уменьшение количества газов обратного потока по отношению к прямому сокращает зону выделения $CO_2$, а увеличение относительного количества газов обратного потока, наоборот, увеличивает эту зону.

Для наиболее полной очистки воздуха от $CO_2$ необходимо, чтобы температура охлажденного воздуха прямого потока в конце периода теплого дутья превышала температуру сухого насыщенного пара воздуха (при данном давлении в регенераторах) не более чем на 6 °С. Если, например, избыточному давлению воздуха в регенераторах 6 *кгс/см*$^2$ соответствует температура насыщения —173 °С (по диаграмме *T—i*), то температура воздуха на холодном конце регенераторов должна быть не выше —167 °С). Различные способы сближения температур прямого и обратного потоков на холодном конце, применяемые для самоочистки насадки от $CO_2$, были описаны в гл. 4.

**Регенераторы с дисковой алюминиевой насадкой.** Такой регенератор (рис. 8.8) представляет собой сварной цилиндрический корпус *1*, в который уложена насадка *2* в виде набора дисков, свернутых из двух гофрированных (рифленых) алюминиевых лент (см. рис. 8.8, *в*). Гофры лент направлены в противоположные стороны, вследствие чего в дисках образуется большое число извилистых каналов, способствующих лучшему перемешиванию потоков газов и большему их контакту с поверхностью насадки. В средней части азотного регенератора (в установках с использованием «тройного» дутья) имеется штуцер *3* для отвода петлевого потока воздуха (см. рис. 8.8, *а*).

Корпус регенератора изготовляют из хладостойкой хромоникелевой стали 1Х18Н9Т или хромомарганцовоникелевой стали



Х14Н14Н3Т, содержащей в среднем 3% никеля и добавку титана. Верхние крышки (теплого конца) регенераторов, работающие при положительной температуре, изготовляют из малоуглеродистой стали.

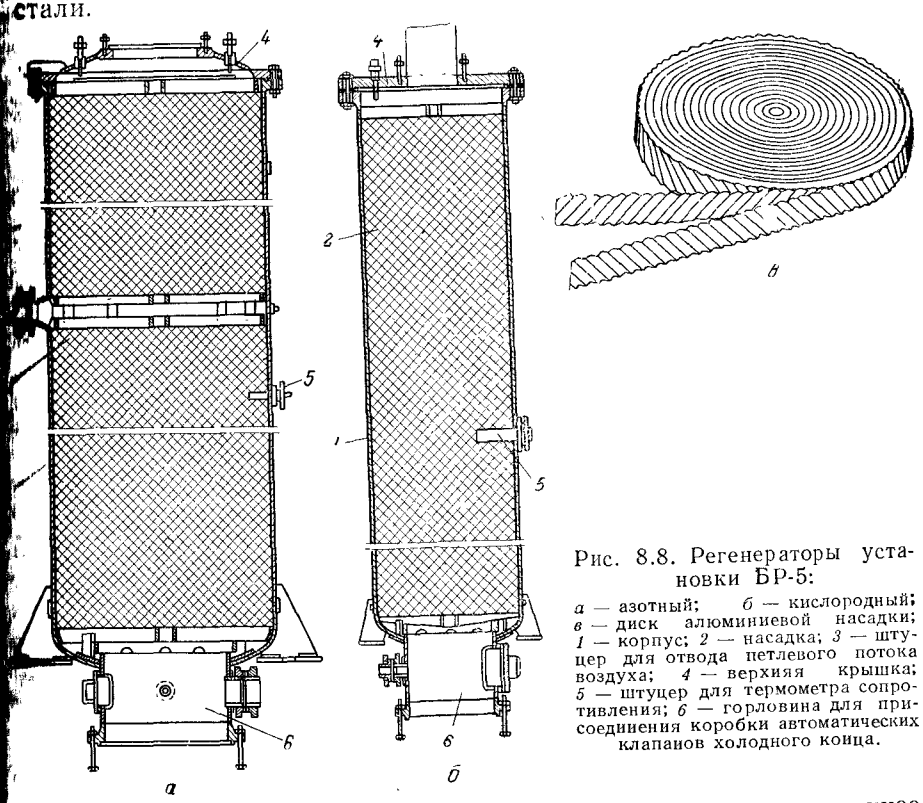



Рис. 8.8. Регенераторы установки БР-5:

*а* — азотный; *б* — кислородный; *в* — диск алюминиевой насадки; *1* — корпус; *2* — насадка; *3* — штуцер для отвода петлевого потока воздуха; *4* — верхняя крышка; *5* — штуцер для термометра сопротивления; *6* — горловина для присоединения коробки автоматических клапанов холодного конца.

Регенераторы изготовляют теперь цельносварными; верхнее днище приваривают на месте монтажа после заполнения корпуса регенератора насадкой из дисков гофрированной алюминиевой ленты. Такую конструкцию имеют, например, регенераторы установки КтК-35-2. В нижней части этих регенераторов между двумя решетками насыпан слой дробленого базальта толщиной 400—500 *мм* для дополнительной очистки воздуха от углеводородов. Азотные регенераторы установки КтК-35-2 имеют корпус из нержавеющей стали толщиной 12 *мм* (внутренний диаметр 3200 *мм*, общая высота 6950 *мм*).

Шаг и высота рифления

| Пояс | Шаг рифления, *мм* | Высота рифления, *мм* | Свободный объем, % | Удельная поверхность, $м^2/м^3$ |
|---|---|---|---|---|
| Верхний | 4,71 | 1,92—2,0 | 75,3 | 1070 |
| Средний | 3,92 | 1,5—1,6 | 70,0 | 1320 |
| Нижний | 3,14 | 1,0—1,1 | 59,0 | 1790 |

Большая высота рифления и большой шаг для верхних поясов приняты для увеличения живого сечения и снижения гидравлического сопротивления в верхней (теплой) части насадки, где проходящий воздух имеет меньшую плотность и больший удельный объем. Угол наклона рифа равен 45°, ширина ленты 50 *мм*.

Скорость газа — 2,6—2,8 *м/сек*, отнесенная к свободному сечению кожуха регенератора и нормальным физическим условиям (0 °С, 760 *мм рт. ст.*).

Опытами Ю. В. Светлова*, исследовавшего 27 различных типов дисковых насадок из рифленой алюминиевой ленты, выявлено, что на эффективность насадки большое влияние оказывают геометрические размеры рифления, так как от этого зависят условия протекания газов по каналам насадки и коэффициент теплопередачи от газа к насадке. Установлено, что более эффективной (в 2,6 раза по сравнению с применявшейся ранее) является насадка из ленты толщиной 0,65 *мм*, высотой 50 *мм*, шаг рифлений 5—6 *мм* (в среднем 4,78 *мм*), угол рифления 60°, угол между рифами в соседних дисках 90°, количество прорезей в ленте 6, расстояние между прорезями 8—9 *мм*.

В некоторых крупных установках использовалась лента шириной 115 *мм*, снабженная прорезями длиной по 50 *мм* с интервалами 10 *мм*. Прорези по высоте ленты расположены в девять рядов, а концы их смещены на 30 *мм* по отношению к прорезям предыдущего ряда.

Поверхность насадки регенератора рассчитывают исходя из количества теплоты, которое насадка должна передать от воздуха азоту или кислороду (тепловой нагрузки). Коэффициент теплоотдачи принимают равным 40—50 *ккал/(м²·ч·град)*.

Количество тепла $Q_т$, передаваемое от воздуха насадке, и количества тепла $Q_x$, передаваемое от насадки газу обратного потока, равно:

$$Q_т = Q_x = S\alpha\Delta t\tau \qquad (8.2)$$

где $S$ — поверхность насадки, *м²*;
$\alpha$ — коэффициент теплоотдачи, *ккал/(м²·ч·град)*;
$\Delta t$ — разность температур газа и поверхности насадки, *град*;
$\tau$ — продолжительность периода дутья, *ч*.

Массу насадки можно приближенно определить по формуле

$$G_н = \frac{Q_т}{c_н (t_2 - t_1)} \qquad (8.3)$$

где $G_н$ — масса насадки, *кг*;
$c_н$ — массовая теплоемкость насадки для алюминия — 0,19 *ккал/(кг·град)*;
$t_2 - t_1$ — изменение температуры (прогрев) насадки за время одного периода теплого дутья, *град*.

* См. Кислородная промышленность, Гипрокислород, изд. НИИТЭХИМ № 1, 1969.



Из формул (8.2) и (8.3) следует, что при заданной поверхности (массе) насадки можно, изменяя продолжительность периода дутья, регулировать тепловой режим работы регенератора.

Вследствие большой сложности процессов теплообмена и протекания газов в регенераторах точный теоретический тепловой и гидравлический расчет их затруднен. Поэтому для расчетов регенераторов используют экспериментальные данные и зависимости, полученные в результате многочисленных опытов.

Расчеты регенераторов могут проводиться по «принципу подобия», т. е. используя данные о работе регенераторов действующей или опытной установки. В этом случае пользуются соотношениями

$$D_x = D\sqrt{\frac{V_x}{V}} \quad \text{и} \quad G_x = G\frac{D_x^2}{D^2} \qquad (8.4)$$

где $D$, $V$, $G$ и $D_x$, $V_x$, $G_x$ — соответственно диаметры, количества проходящего воздуха (*м³/ч*) при 0 °С, 760 *мм рт. ст.* и массы (*кг*) насадки работающего и рассчитываемого регенераторов.

Забивка насадки твердой двуокисью углерода происходит в тех случаях, когда удельная тепловая нагрузка в зоне вымораживания $CO_2$ превышает определенную величину, найденную экспериментально. Например, В. Ф. Густов установил, что при отношении давлений прямого и обратного потоков 4,4—5 длительная работа регенераторов с насадкой из алюминиевой ленты толщиной 0,46 *мм* и высотой 34 *мм* обеспечивается при удельной тепловой нагрузке в зоне вымораживания $CO_2$ не более 8—9 *ккал* на 1 *кг* насадки за 1 цикл. Уменьшение высоты диска до 20 *мм* повышает допустимую удельную нагрузку на 20—25%.

При расчете регенераторов приходится для данных температурных условий подбирать массу насадки так, чтобы удельная тепловая нагрузка не превышала допустимой величины. При соблюдении этого условия регенераторы не забиваются твердой $CO_2$ даже при очень длительной их работе.

Намотка ленты в дисках насадки должна быть плотной. Отклонения по массе каждого диска допускаются не более ±3% указанной на чертеже. При укладке насадки в корпус регенератора необходимо обеспечить плотное прилегание дисков к обечайке, для чего в зазор закладываются куски ленты. Если есть зазоры, то воздух и обратные газы будут проходить через них, вследствие чего может начаться обмерзание регенераторов на теплом конце, что вызовет увеличение потерь холода от недорекуперации.

Техническая характеристика регенераторов с алюминиевой насадкой приведена в табл. 8.4.

**Регенераторы с насыпной (базальтовой) насадкой.** В этих регенераторах применяется насыпная каменная насадка из кусков базальта размером 4—10 *мм*. Регенераторы с такой насадкой используются в установках для получения чистых кислорода и азота.

Таблица 8.4. **Характеристика регенераторов с алюминиевой насадкой**

| Установки | Газ обратного потока | Количество газа, $м^3/ч$ | Внутренний диаметр регенератора, *мм* | Скорость газа по свободному сечению корпуса, *м/сек* | Насадка | | Удельное количество воздуха $м^3/кг$ насадки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | поверхность, $м^2$ | масса, *кг* | |
| КГ-300М | Азот | 1 200 | 400 | 2,65 | 686 | 426 | 2,82 |
| КТ-1000М | Кислород | 1 160 | 400 | 2,55 | 686 | 426 | 2,72 |
| » | Азот | 4 340 | 700 | 3,28 | 2 010 | 1 206 | 3,59 |
| КТ-3600Ар | Кислород | 3 460 | 700 | 2,6 | 2 010 | 1 206 | 2,86 |
| » | Азот | 15 740 | 1 400 | 2,8 | 9 050 | 5 620 | 2,80 |
| Кт-5-2 | Кислород | 5 300 | 900 | 2,3 | 3 560 | 2 160 | 2,38 |
| » | Азот | 22 650 | 1 600 | 3,1 | 11 360 | 6 900 | 3,3 |
| Кт-12-2* | Кислород | 13 000 | 1 400 | 2,3 | 8 570 | 5 200 | 2,42 |
| » | Азот | 50 600 | 2 600 | 2,65 | 28 900 | 17 570 | 2,9 |
| КтК-35-2 | Азот | 66 600 | 3 200 | 2,3 | 50 500 | 30 000 | 2,2 |

* Регенераторы КтА-12-2, КтК-12-1 и К-11-1 по конструкции аналогичны.

Свободный объем для каменной насадки примерно в 1,5 раза меньше, чем для алюминиевой. Соответственно уменьшается и поверхность теплообмена на единицу массы и объема. Вследствие этого для получения тех же гидравлических сопротивлений каменной насадки скорость потока газов в ней должна быть уменьшена в 2,5 раза. Диаметр регенератора для каменной насадки должен быть бо́льшим, чем регенератора с насадкой из алюминиевой ленты, а продолжительность дутья увеличена до 9—10 *мин*, что снижает потери воздуха от продувки регенераторов.

В толще насыпной насадки можно размещать змеевики для отвода чистых продуктов через регенераторы. В этом случае получаемые продукты разделения не загрязняются кислородом и азотом воздуха, остающихся в насадке от периода воздушного дутья, а также влагой и двуокисью углерода, уносимыми с насадки газами обратного потока.

Передача тепла между теплообменивающимися газами через стенки труб змеевика, расположенного в регенераторе с каменной насадкой, ухудшается вследствие отложений на трубках льда и твердой $CO_2$. Кроме того, разность температур между газами здесь незначительна, вследствие чего поверхность змеевиков в регенераторах в 2—3 раза больше, чем в обычных трубчатых теплообменниках для нагревания такого же количества газов.

Наличие змеевиков усложняет изготовление регенераторов и увеличивает их объем (в 5—6 раз) по сравнению с регенераторами, имеющими насадку из дисков алюминиевой ленты. Большая масса каменной насадки требует более длительного времени для ее охлаждения до рабочих температур, что удлиняет пусковой период установки.

Чтобы регенераторы не забивались льдом и твердой $CO_2$, необходимо обеспечить прохождение через каменную насадку газов



обратного потока в количестве не менее 65% от количества воздуха прямого потока.

Характеристика базальтовой насыпной насадки приводится ниже:

| | Мелкая | Средняя | Крупная |
|---|---|---|---|
| Размер кусков, *мм* | 3,5 | 6,5 | 10,5 |
| Объемная масса, $кг/м^3$ | 1 740 | 1 740 | 1 740 |
| Удельная поверхность, $м^2/м^3$ | 1 450 | 790 | 485 |
| Свободный объем, $м^3/м^3$ | 0,42 | 0,42 | 0,42 |
| Теплоемкость базальта при 20—100 °С, *ккал/(кг·град)* | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Теплопроводность базальта при 100 °С, *ккал/(м·ч·град)* | 1,87 | 1,87 | 1,87 |
| Скорость фильтрации газа, *кг/(м²·сек)* | 2,23—6,85 | 3,44—6,95 | 2,25—6,98 |
| Коэффициент теплоотдачи *ккал/(м²·ч·град)* | 102—180,5 | 98,2—210,8 | 85,5—167,8 |
| Объемный коэффициент теплоотдачи, *ккал/(м³·ч·град)* | 148 000—262 000 | 77 600—166 800 | 41 500—81 400 |

Базальтовая насадка (СТУ - 75—63) должна удовлетворять следующим требованиям:

| | |
|---|---|
| Прочность по шкале Мосса | 3000—3500 |
| Твердость по шкале Мосса | 6—7 |
| Пористость, % | Не более 0,3 |
| Плотность, $г/см^3$ | 2,6—3,2 |
| Истираемость, $г/см^3$ | 0,1—0,3 |

Наличие в насадке песка, суглинка и т. п. не допускается. При резком изменении температуры она не должна растрескиваться. Вместо базальта могут применяться и другие виды камня с аналогичной характеристикой (например, кварцит шокшинский, морская галька и др.).

Насадка засыпается в регенератор на месте монтажа, после его сборки и установки змеевиков для чистых газов. Кусочки насадки должны заполнить все пространство между витками труб. В процессе эксплуатации блока происходит оседание насадки, поэтому следует периодически досыпать в регенератор новые порции базальта.

В прежних конструкциях регенераторов с насыпной насадкой вывод коллекторов змеевиков чистых продуктов осуществлялся через сальники, установленные в крышке и днище регенератора. В современных конструкциях регенераторы делают цельносварными и трубные решетки (коллекторы), в которые вварены концы трубок змеевиков, вваривaются в днища регенератора. Примером такой конструкции является цельносварной регенератор установки БР-14, показанный на рис. 8.9. Регенератор этой установки изготовляют из алюминиевого сплава АМг-5 и заполняют базальтовой насадкой в зернах размером 7—10 *мм*. Змеевики регенератора изготовлены из алюминиевых трубок сплава АД-1 (диаметр 12×1,5 *мм*, длина 65 *м*, шаг навивки 24 *мм*, расстояние между трубками в радиальном направлении 40 *мм*).

Для фиксации положения трубок змеевиков между ними устанавливаются штампованные профильные проставки с вырезами для труб. Трубные решетки изготовляют из сплава АМцС с применением аргоно-дуговой сварки. Избыточное рабочее давление

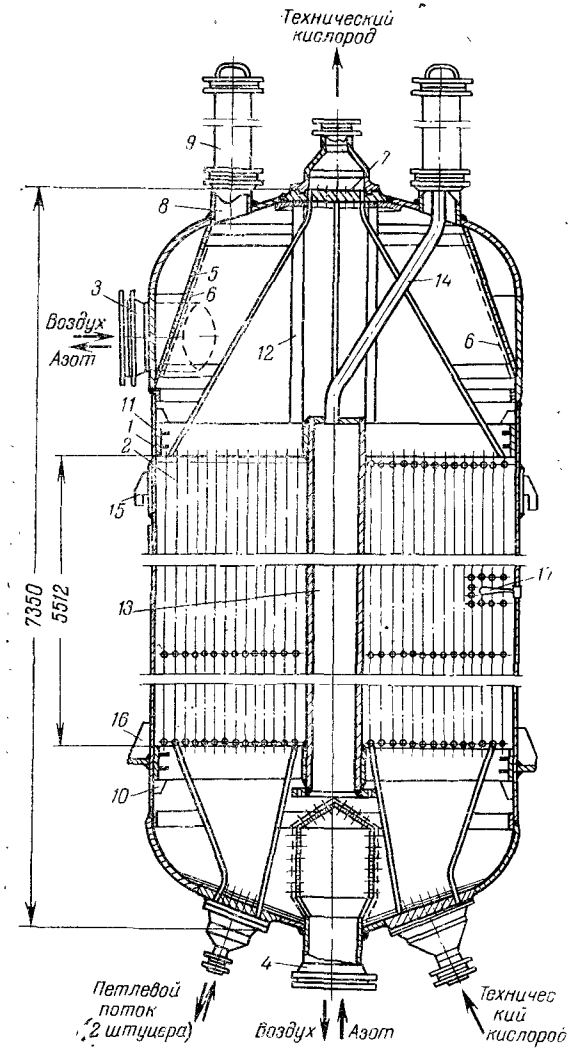



Рис. 8.9. Регенератор установки БР-14:

*1* — корпус; *2* — змеевик; *3* — штуцер верхний; *4* — штуцер нижний; *5* — конус с отверстиями; *6* — сетка с ячейками 2 × 2 *мм*; *7* — трубная решетка; *8* — штуцер для засыпки насадки; *9* — трубка с резервной насадкой; *10* — кронштейн нижний; *11* — кронштейн верхний; *12* — тяга; *13* — сердечник; *14* — труба; *15* — крюк; *16* — лапа; *17* — бобышка термометра.

6 *кгс/см*². В других установках, например АКт-16-2, корпус, днища и трубные решетки цельносварных регенераторов изготовляют из нержавеющей стали марок Х18Н10Т или Х14Г14Н3Т, а змеевики (из трубок размером 24×2 *мм*) — из алюминиевого сплава АД-1. Для возможности вварки концов змеевиков в решетки применяют переходники из стали Х18Н10Т, к которым с одного конца приварены муфты из сплава АД-1. На эти муфты в раструб надевают концы труб и приваривают их по окружности аргоно-дуговой сваркой. Второй конец переходника вставляют в решетку из нержавеющей стали и обваривают по кромке. Для вывода воздуха петлевого потока в середине (по высоте) регенератора делается кольцевой коллектор.



Каменную насадку перед загрузкой очищают от пыли продувкой воздухом в специальном эжекторном устройстве. Засыпку производят в регенераторы, предварительно заполненные водой, для предупреждения повреждения трубок змеевиков падающими кусками насадки. При засыпке применяют устройства, механизирующие процесс очистки и засыпки насадки. Заполненные насадкой регенераторы освобождают от воды и затем подвергают длительной (до 10—12 суток) продувке воздухом для просушки и удаления пыли. По мере продувки и оседания насадки ее добавляют через загрузочные устройства.

Техническая характеристика регенераторов с насыпной базальтовой насадкой дана в табл. 8.5.

Таблица 8.5. **Техническая характеристика регенераторов с базальтовой насыпной насадкой**

| Установки | Газ обратного потока | Количество газа, *м³/ч* | | Внутренний диаметр регенератора, *мм* | Масса базальтовой насадки, *т* | Змеевики | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | прямой поток | обратный поток | | | газ | размер трубок, *мм* | средняя длина трубок, *м* | количество трубок, шт. | поверхность, *м²* |
| АКт-16-1 и | $O_2$ | 13 640 | 8 800 | 2 412 | 95 | Азот чистый | 24×2 | 90 | 133 | 900 |
| | | | | | | Воздух сухой | 24×2 | 90 | 14 | 95 |
| АКт-16-2 | $N_2$ | 32 340 | 20 870 | 3 400 | 130 | Азот чистый | 24×2 | 86 | 281 | 1 815 |
| | | | | | | Воздух сухой | 24×2 | 86 | 16 | 103 |
| АКт-17-1 | $O_2$ | 21 400 | 16 000 | 2 812 | 83 | Азот чистый | 24×2 | 95 | 206 | 1 680 |
| | $N_2$ | 21 500 | 17 300 | 2 812 | 83 | Азот чистый под давлением | 24×2 | 95 | 7 | 58 |
| | | | | | | Азот петли | 24×2 | 44 | 37 | 153 |
| | | | | | | Воздух сухой | 24×2 | 95 | 1 | 8,2 |
| | | | | | | Кислород высокого давления | 16×2 | 100 | 1 | 5,1 |
| БР-14 | $N_2$ | 4 200 | 3 600 | 1 400 | 17 | Кислород чистый | 12×1,5 | 38 | 116 | 167,5 |
| | | | | | | Воздух петли | 12×1,5 | 21 | 61 | 48,5 |
| КтК-35-2 | $O_2$ | 30 350 | 24 000 | 3 400 | 130 | Кислород чистый | 24×2 | 86 | 281 | 1 815 |
| | | | | | | Воздух сухой | 24×2 | 86 | 16 | 108 |

**Клапанное устройство регенераторов.** Потоки воздуха и обратных газов в регенераторах переключаются через систему клапанов. На теплом конце установлены переключающие клапаны с принудительным открытием, а на холодном конце — клапаны автоматические, открывающиеся под напором газа и закрывающиеся под действием пружин.

Применяют переключающие клапаны с резиновым уплотнением, без демпфера (рис. 8.10). Поршень *1* воздушного цилиндра *2* уплотняется резиновыми кольцами, не требующими постоянной подачи смазки; эти кольца смазывают солидолом один раз в 4—6 месяцев. Для уплотнения клапана *6* применяется резина, уложенная в паз. Такое уплотнение не требует притирки и обеспечивает высокую степень герметичности клапана. Для плавной посадки клапана применяется дросселирование воздуха на выходе из воздушного цилиндра, вследствие чего необходимость в использовании специального демпфера отпадает.

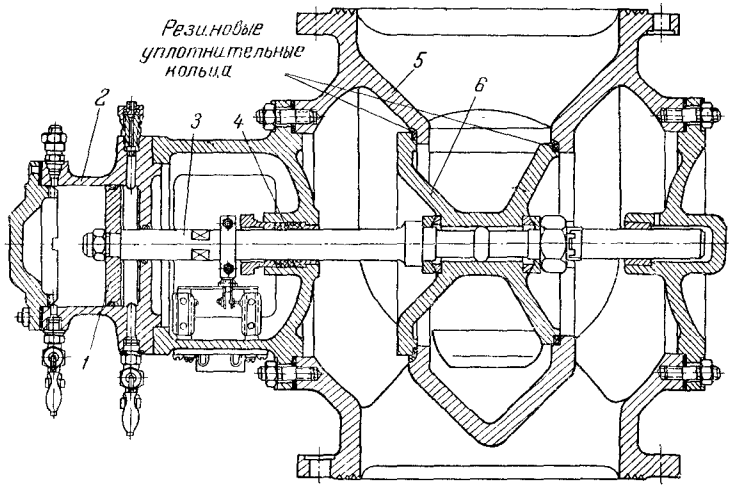



Рис. 8.10. Клапан переключающий принудительного действия:
*1* — поршень воздушного цилиндра; *2* — воздушный цилиндр; *3* — шток; *4* — сальники; *5* — корпус; *6* — клапан двухседельный (золотник).

Впуск сжатого воздуха в пневматические клапаны принудительного действия и выпуск воздуха из них производятся через переключающий механизм, снабженный системой клапанов. Эти клапаны (приказные) в определенные моменты распределения открываются кулачками, установленными на распределительном валу, который вращается с заданным числом оборотов от отдельного электродвигателя.

Схема переключения клапанов пары регенераторов показана на рис. 8.11. Сжатый воздух поступает в коллектор *1* переключающего механизма с двухседельными распределительными клапанами *2*. Через трубки и клапаны пневматические цилиндры переключающих клапанов *6* принудительного действия регенераторов *7* сообщаются с впускным коллектором *1* и выхлопным коллектором *5*. Клапаны *2* открываются под действием кулачков *4*, посаженных на вал *3*, а закрываются пружинами (на схеме не показаны).



Проследим по схеме взаимодействие одной из пар распределительных клапанов, например *А* и *Б*, и *А'* и *Б'* с принудительными клапанами *I* и *II*. В положении клапанов, указанном на схеме, сжатый воздух через распределительный клапан *А* поступает в правую полость цилиндра принудительного клапана *I* и толкает его

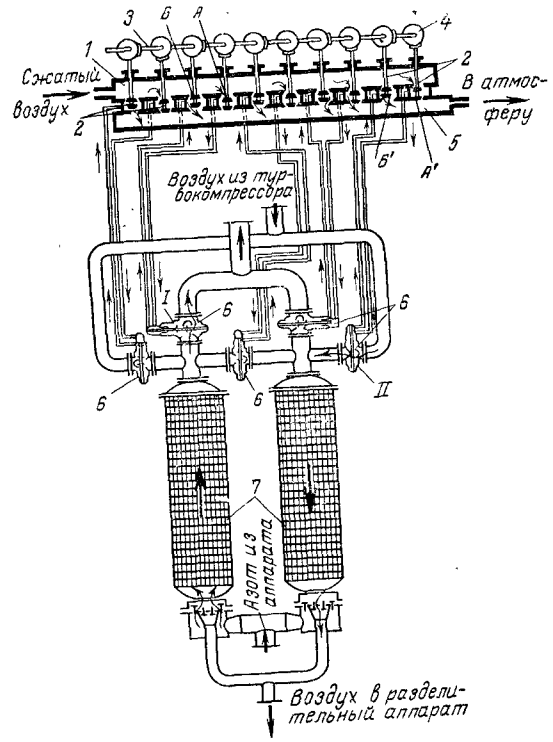



Рис. 8.11. Схема переключения клапанов пары регенераторов:
*1* — впускной коллектор; *2* — распределительные (приказные) клапаны переключающего механизма; *3* — распределительный вал; *4* — кулачки; *5* — выхлопной коллектор; *6* — переключающие клапаны принудительного действия; *7* — регенераторы

поршень влево. В это же время вторая полость цилиндра через распределительный клапан *Б* сообщается с выхлопным коллектором, куда выходит воздух из левой полости цилиндра. Вследствие этого клапан *I* открывается и азот начинает проходить через левый регенератор. Одновременно изменяется положение распределительных клапанов *А'* и *Б'* и принудительного клапана *II*, расположенного на воздушной линии компрессора, который также

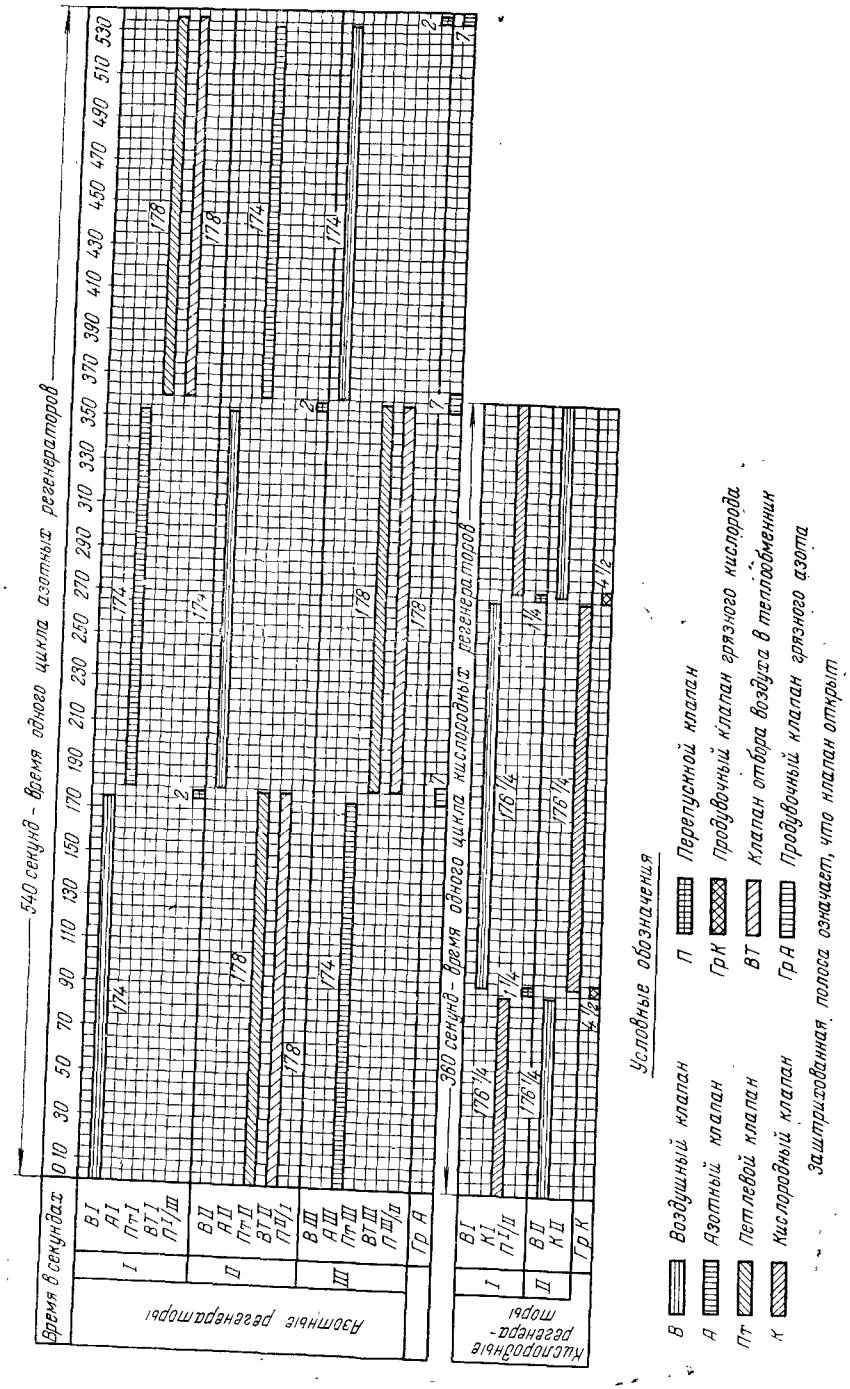



Рис. 8.13. Цикловые диаграммы работы клапанов регенераторов БР-1.

открывается, и поток воздуха из компрессора направляется через правый регенератор.

Общая схема коммуникаций переключающих клапанов азотных и кислородных регенераторов установки БР-1, работающих по принципу «тройного дутья», и схема расположения коллекторов даны на рис. 8.12 (см. Приложение). Цикловые диаграммы работы клапанов приведены на рис. 8.13. Порядок и продолжительность включения клапанов указаны на диаграммах.

Механизм переключения клапанов регенераторов установки БР-1 показан на рис. 8.14. На плите *1* установлены кулачковый вал *2* с распределительными дисками для азотных регенераторов и кулачковый вал *7* с дисками для кислородных регенераторов. Валы вращаются электродвигателем *10* через клиноременную передачу *8* и зубчатые колеса коробки передач *5*. При вращении кулачковых валов распределительные диски открывают соответствующие клапаны коллекторов* и сжатый воздух направляется в механизмы переключающих клапанов принудительного действия.

В установках БР-2М используется система электромеханического переключения пневмоприводов принудительных клапанов регенераторов, состоящая из механизма включения и механизма переключения. Механизм включения с помощью электродвигателя, системы кулачковых дисков и микропереключателей периодически включает в установленное цикловой диаграммой время электродвигатели механизма переключения клапанов азотных и кислородных регенераторов.

Приказной сжатый воздух подведен к приказным клапанам механизма переключения, которые открываются под действием кулачков, сидящих на двух распределительных валах системы переключения азотных и кислородных регенераторов. Каждый вал вращается от своего электродвигателя в периоды, определяемые работой механизма включения. Приказные клапаны при открытии подают сжатый воздух в воздухораспределители (золотники), откуда он поступает в рабочий цилиндр соответствующего клапана регенератора, открывая или закрывая его.

Воздухораспределители установлены в непосредственной близости от принудительных клапанов регенераторов, что обеспечивает четкость и надежность действия системы.

Механизм включения располагается на щите управления и служит также для ручного и автоматического регулирования теплового режима регенераторов путем изменения длительности прохождения в них прямого и обратного потоков воздуха и газов. Для этого в нем предусмотрены соответствующие устройства, действующие на подвижные микропереключатели, определяющие длительность дутья.

---

* Назначение коллекторов *Б*, *В*, *Г*, *Д* и *Е* показано на рис. 8.12 (см. Приложение).

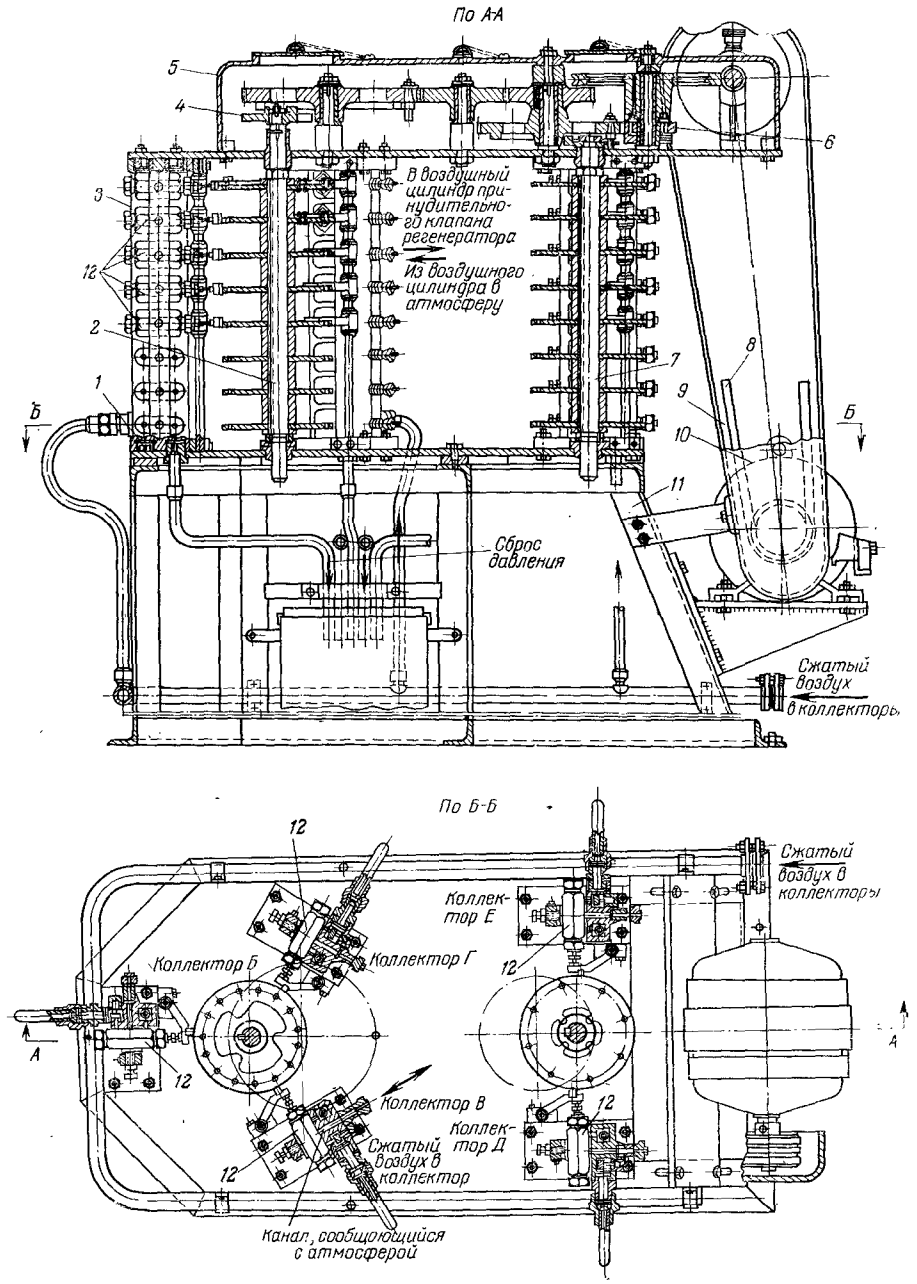



Рис. 8.14. Механизм переключения клапанов регенераторов установки БР-1

*1* — плита; *2* — кулачковый вал с распределительными дисками для азотных регенераторов; *3* — коллектор с приказными клапанами; *4* — мальтийский крест; *5* — коробка передач; *6* — механизм, разобщающий передачу при ручном повороте; *7* — кулачковый вал с распределительными дисками для кислородных регенераторов; *8* — клиноременная передача; *9* — ограждение ременной передачи; *10* — электродвигатель; *11* — рама; *12* — клапаны приказные.

Автоматические клапаны холодного конца для регенератора диаметром 700 *мм* показаны на рис. 8.15. В латунную плиту *3* вставлены четыре втулки с пружинными тарельчатыми клапана-

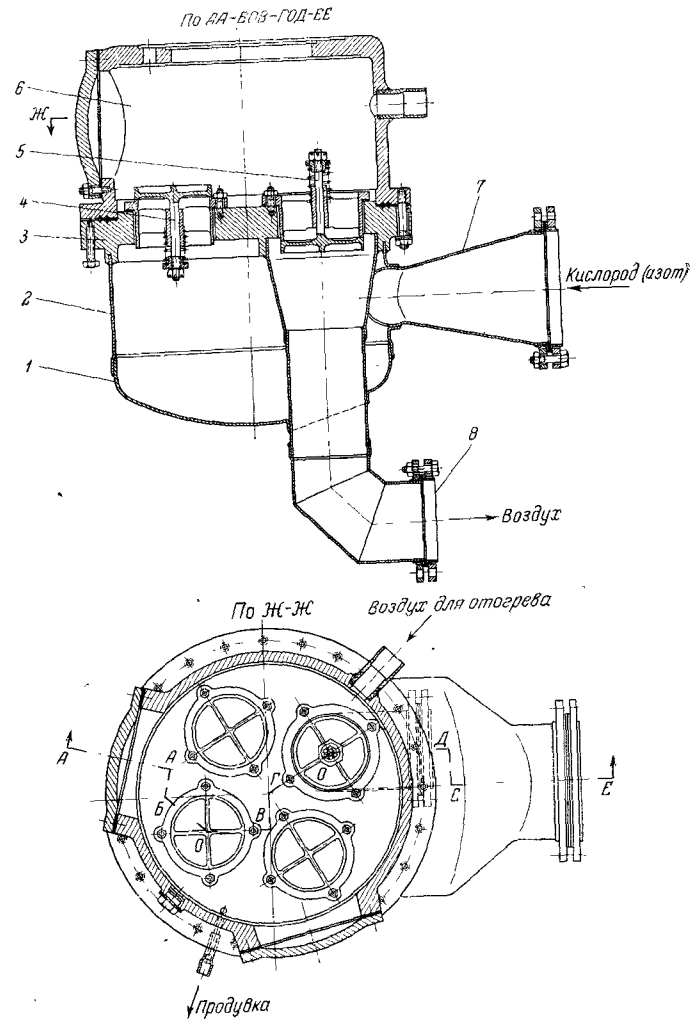



Рис. 8.15. Автоматические клапаны холодного конца для регенератора диаметром 700 *мм*:

*1* — днище; *2* — обечайка; *3* — плита; *4* — обратные клапаны диаметром 131 *мм* (3 шт.); *5* — воздушный клапан диаметром 142 *мм*; *6* — чаша; *7* — патрубок; *8* — колено. Площадь прохода клапанов: воздушного — 0,0136 $м^2$; трех обратных клапанов 0,034 $м^2$. Скорость протекания в клапанах: воздуха — 4—5 *м/сек*; обратного газа 6—9 *м/сек*.

ми *4* и *5*. Клапан *5* служит для пропуска прямого потока воздуха, а клапаны *4*, открывающиеся в противоположную сторону,— для обратных потоков азота или кислорода. Втулки изготовлены из кремнистой латуни ЛК-80-3 с содержанием 79—81% меди 2,5—4% кремния, а тарелки клапанов — из алюминиевого сплава (для уменьшения массы клапана и сил инерции при открывании потоком газа, также силы удара при закрытии клапана пружиной).

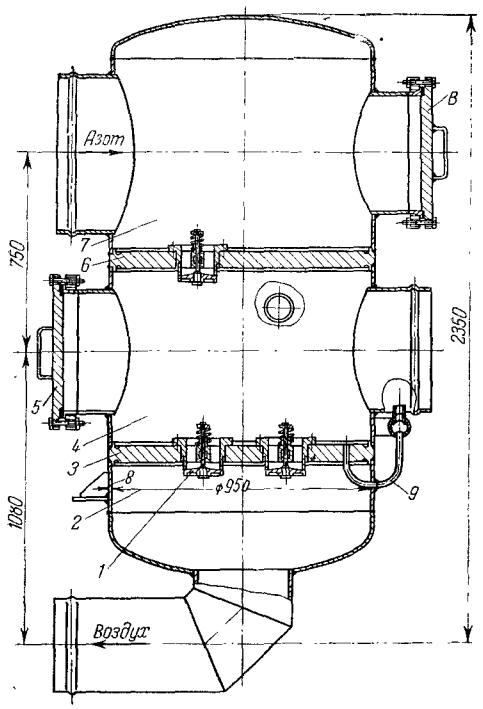



Рис. 8.16. Сварная коробка клапанов холодного конца регенераторов:

*1* — клапан автоматический; *2* — нижняя полость; *3* — нижняя плита; *4* — средняя полость; *8* — люки для ревизии клапанов; *7* — верхняя полость; *9* — трубка для слива конденсата.

В современных установках применяют клапанные коробки холодного конца регенераторов, сваренные из нержавеющей стали Х18Н10Т или Х14Г14Н3Т (рис. 8.16). Коробка разделена на три полости двумя плитами, в которых установлены автоматические клапаны. Средняя полость соединяется трубопроводом с патрубком холодного конца регенератора, верхняя — с трубопроводом потока газов низкого давления (кислорода или азота), нижняя — с воздушным коллектором. Седло автоматических клапанов изготовлено из алюминиевого сплава АЛ-9, тарелки — из сплава АК-8, шток — из стали Х18Н10Т, пружины — из бронзы КМц-3-1.

Регенератор установки КА-5 с присоединенной к нему сварной коробкой клапанов холодного конца показан на рис. 8.17. Принудительный холодный клапан потока петлевого воздуха установки БР-1 показан на рис. 8.18. Клапан вертикальный, его нижняя часть (холодная) располагается в изоляции кожуха блока и отделена от верхней (теплой) части текстолитовой прокладкой. Клапан работает при температуре воздуха 100—160 °К и избыточном давлении до и после тарелок 5—6 *кгс/см*², вследствие чего тарелки уравновешены в отношении давления воздуха и для их подъема и опускания не требуется значительных усилий. Скорость воздуха в сечении клапана 4—6 *м/сек*. Корпус клапана отлит из латуни ЛК-80-3Л, тарелки выполнены из латуни ЛЖМц-59-1-1; сальниковая набивка клапана в холодной и теплой частях — из фторо-



пласта-4, штоки — нержавеющей стали 1Х18Н9 или 1Х18Н9Т. В установке БР-1 установлено три клапана — по одному на каждый азотный регенератор.

Основные неполадки в работе регенераторов — это пропуск в клапанах, поломка клапанов принудительного и автоматического

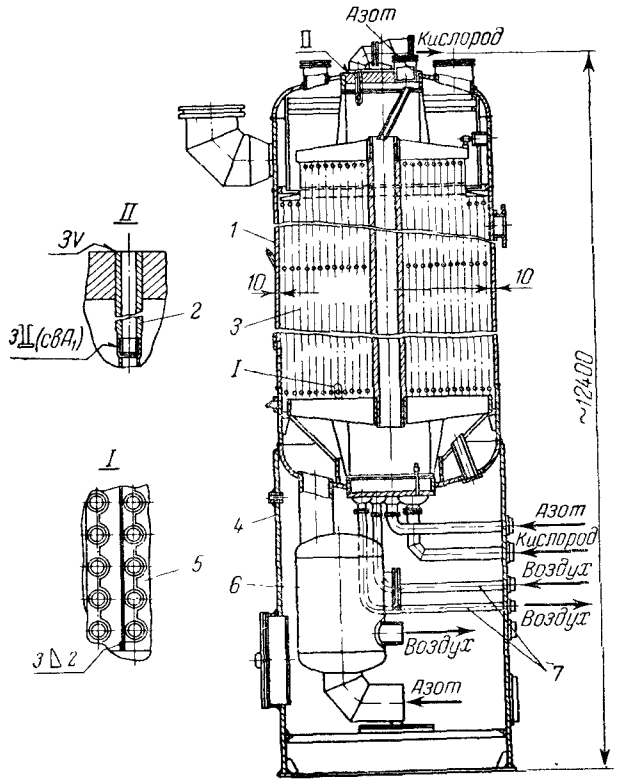



Рис. 8.17. Регенератор установки КА-5 в сборе с клапанной коробкой холодного конца:

*1* — корпус регенератора; *2* — переходник для вварки труб в решетку; *3* — змеевики; *4* — опора; *5* — профильная проставка; *6* — клапанная коробка; *7* — патрубки воздуха петлевого потока.

действия, неисправности клапанов механизма переключения. В результате этого нарушается установленное распределение потоков газов в регенераторах и температурный режим.

Герметичность клапанов проверяют пневматическим испытанием при максимальном рабочем давлении. Допускается пропуск одним автоматическим клапаном 0,7—1 *дм³/мин*. Для клапанов принудительного действия допускается пропуск не более 0,5 *дм³/ч* на 1 *см* диаметра прохода клапана.

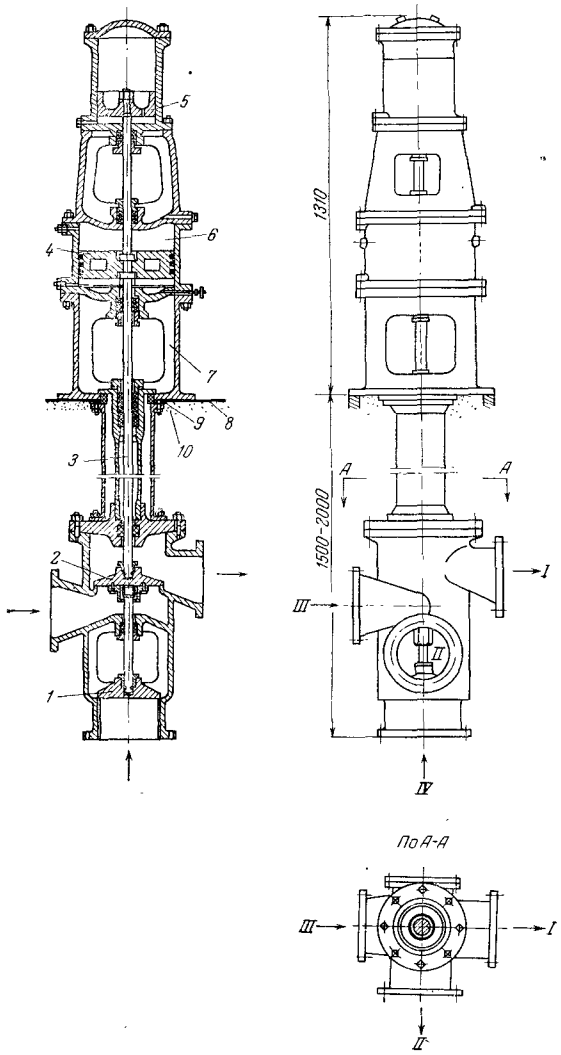



Рис. 8.18. Двухпоточный клапан диаметром 250 *мм* для петлевого воздуха азотных регенераторов БР-1:

*1, 2* — тарелки нижняя и верхняя; *3* — шток; *4* — поршень пневматического привода; *5* — демпфер; *6* — цилиндр пневматического привода; *7* — опора кожуха блока; *8* — кожух блока разделения; *9* — текстолитовая теплоизолирующая прокладка; *10* — изоляция блока. Стрелкой обозначено направление петлевого воздуха: *I* — из клапана в нижнюю часть регенератора; *II* — из клапана в детандерный теплообменник и нижнюю колонну; *III* — из трубопровода после холодного конца регенераторов в клапан; *IV* — из середины регенератора в клапан.



## 8.3. КОНДЕНСАТОРЫ

Конденсаторы представляют собой трубчатые теплообменные аппараты, концы труб которых впаяны в трубные решетки.

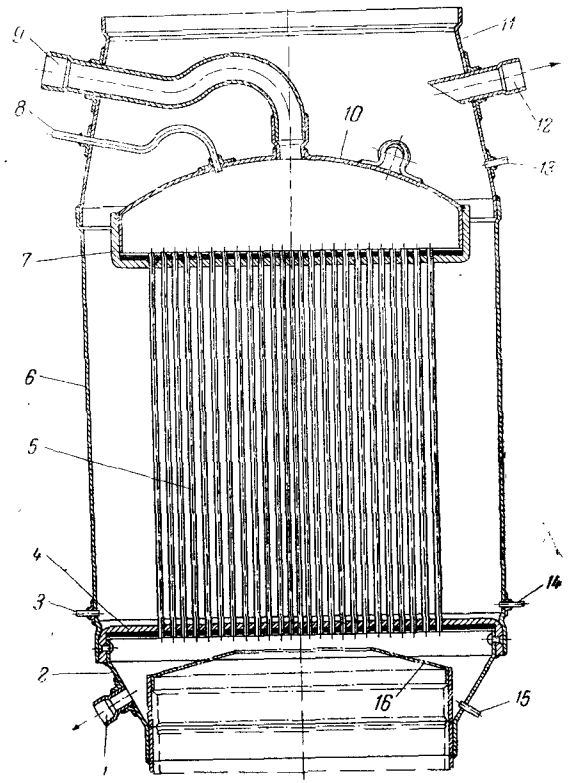


Рис. 8.19. Конденсатор установки УКГС-100:

*1* — штуцер слива жидкого азота; *2, 11* — конусы; *3* — трубка к указателю уровня; *4* — нижняя решетка; *5* — трубки; *6* — обечайки; *7* — верхняя решетка; *8* — трубка продувки неоно-гелиевой смеси; *9* — штуцер отвода к предохранительному клапану; *10* — крышка; *12* — штуцер отвода кислорода; *13* — трубка к манометру; *14, 15* — трубки для отбора проб на анализ; *16* — нижняя колонна.

В конденсаторе кислородного аппарата УКГС-100 производительностью 115 $м^3/ч$ (рис. 8.19) верхняя *7* и нижняя *4* решетки изготовлены из листовой меди и облужены. В решетки впаяны 1597 медных трубок *5* размером 8×0,5 *мм*. Общая поверхность теплообмена такого конденсатора 20,7 $м^2$. Верхняя решетка закрыта крышкой *10*; к нижней припаяна наружная обечайка *6*, верхняя часть которой соединяется с верхней ректификационной колонной конусом *11*. Снизу к решетке *4* припаян конус *2*, соединяющий конденсатор с нижней колонной. Азот конденсируется в трубках, а кислород кипит в межтрубном пространстве конденсатора. Штуцер *12* служит для отвода газообразного кислорода, а штуцер *9* ведет к предохранительному клапану нижней колонны.

В более крупных воздухоразделительных установках (БР-1, БР-5 и др.) применяются прямотрубные, так называемые «обращен-

ные» конденсаторы, у которых в трубках кипит кислород, подводимый снизу, а в межтрубном пространстве конденсируется азот. Пары кислорода вместе с жидкостью поднимаются вверх, так как паро-жидкостная смесь (эмульсия) имеет меньшую плотность, чем жидкий кислород. Вследствие этого в трубках начинается циркуляция жидкого кислорода, который сливается в центральную трубу, а газообразный кислород отводится из конденсатора через верхний патрубок. В конденсаторах такого типа передача теплоты протекает быстрее и теплообменная поверхность трубок используется лучше, чем в конденсаторах с кипением кислорода в межтрубном пространстве. Например, удельная тепловая нагрузка в конденсаторах обращенного типа (с медными трубками) составляет 60 *ккал/(кг·ч·град)* на 1 *кг* металла против 40 *ккал/(кг·ч·град)* в конденсаторах с кипением кислорода в межтрубном пространстве, т. е. вес конденсатора уменьшается.

Конденсаторы с кипением в трубках стали применять по следующим причинам. Повышение производительности конденсаторов с кипением в межтрубном пространстве вызывает необходимость увеличивать диаметр конденсатора и высоту трубок для того, чтобы получить бо́льшую поверхность теплообмена. Но при этом трубные решетки и конструкция в целом становятся громоздкими и тяжелыми, а изготовление, транспорт и монтаж конденсатора затрудняются. Кроме того, в тяжелых конденсаторах больших габаритов с десятками тысяч трубок трудно обеспечить герметичность. Удлинение же трубок в таких конденсаторах невозможно вследствие заметного снижения коэффициента теплопередачи и увеличения влияния столба жидкости на уменьшение температурного напора (явление так называемой температурной депрессии).

Температурная депрессия обусловлена тем, что давление внизу конденсатора становится больше, чем на поверхности кипящей жидкости, вследствие действия веса столба жидкости. В результате температура кипения жидкого кислорода, которая возрастает с повышением давления, в нижних слоях будет больше, чем в верхних. Это уменьшает температурный напор в конденсаторе, т. е. разность температур между жидким кислородом и парами азота. Чтобы обеспечить передачу необходимого количества теплоты через стенки трубок приходится увеличивать поверхность теплообмена конденсатора или поднимать давление в нижней колонне.

Например, при высоте столба жидкости 1,2 *м* давление внизу конденсатора возрастает на 0,14 *кгс/см*², что соответствует повышению температуры кипения кислорода на 1,3 *град*. При температурном напоре в 3 *град* уменьшение разности температур на 1 *град* равнозначно увеличению поверхности теплообмена на 30%.

В конденсаторах с кипением в трубках последние заполнены паро-жидкостной смесью, поэтому влияние гидростатической температурной депрессии значительно слабее и трубки могут быть более длинными. Для получения необходимой поверхности теплообмена включают параллельно несколько однотипных конденсаторов.

По условиям безопасности обращенный конденсатор не должен работать в «сухом» режиме, когда количества поступающей в него жидкости и отводимого пара равны. Другими словами, в обращенном конденсаторе не должна прекращаться циркуляция жидкости и его трубки должны постоянно быть заполнены паро-жидкостной смесью. При «сухом» режиме работы возможно высаживание на поверхности трубок твердого ацетилена и его взрыв в конденсаторе. Такие случаи неоднократно имели место на практике.



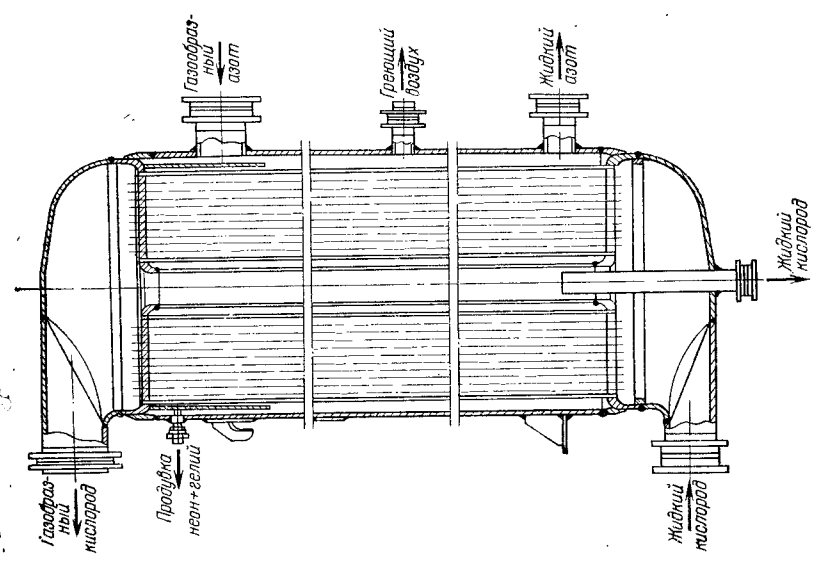



Рис. 8.21. Прямотрубный конденсатор установки БР-14.

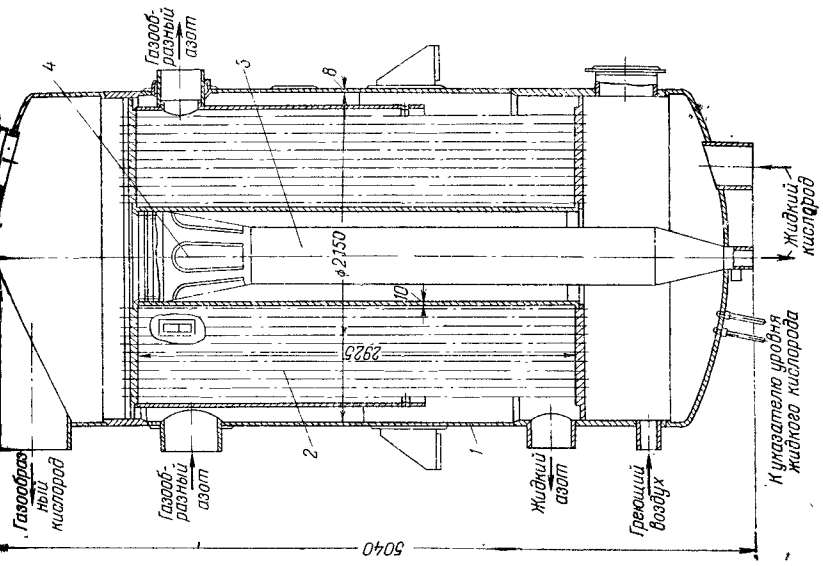



Рис. 8.20. Конденсатор установки КА-13,5:
1 — корпус; 2 — трубки; 3 — центральная труба; 4 — воронка.

Кратность циркуляции, т. е. отношение количества жидкого кислорода, поступающего в трубки на испарение, к количеству образующегося пара должна составлять 5—6. Такая кратность может быть обеспечена, если тепловая нагрузка конденсатора превышает 1200 *ккал/м²·ч*, а относительный уровень* жидкого кислорода более 0,5. При этом необходимо, чтобы все трубки работали одинаково и равномерно.

В обращенных конденсаторах последних конструкций центральная труба для отвода жидкого кислорода поднята почти до верхней решетки и имеет в верхней своей части воронку с прорезями, через которые отводится жидкий кислород. При такой конструкции из верхнего конца трубок всегда будет выходить жидкость вместе с паром и возможность режима «сухого» кипения кислорода в трубках исключается, а конденсатор становится полностью проточным. Конденсатор такой конструкции из нержавеющей стали 1Х18Н10Т (для установки КА-13,5) показан на рис. 8.20, а конденсатор из алюминиевого сплава, изготовленный с применением аргоно-дуговой сварки (для установки БР-14), — на рис. 8.21. Вес этих конденсаторов меньше, и они более надежны в эксплуатации.

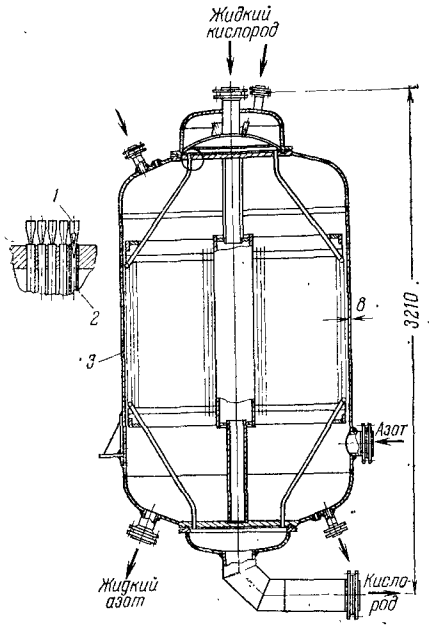



Рис. 8.22. Продукционный конденсатор витого типа:
*1* — распределитель; *2* — трубки; *3* — корпус.

Длина трубок конденсатора БР-14 2960 *мм*, диаметр 12×1,5 *мм*, число трубок 1356 шт. Трубки из сплава АД-1 расположены по шестиграннику, шаг 16 *мм*. К решеткам трубки приварены по кромкам. В центральную трубу вставлена труба 65×2 *мм* для отбора жидкого кислорода в выносной конденсатор. Это обеспечивает проточность конденсатора. Рабочее давление в трубках 0,7 *кгс/см²*, в межтрубном пространстве — 6 *кгс/см²*.

Помимо основных конденсаторов, в крупных установках разделения воздуха применяются также дополнительные (выносные)

* Относительным уровнем называется *отношение превышения уровня жидкого кислорода в трубках над уровнем жидкого азота в межтрубном пространстве конденсатора к рабочей длине трубки.*



конденсаторы для испарения продукционного кислорода. Эти конденсаторы обычно делаются витыми, с кипением кислорода в трубках при избыточном давлении до 1 *кгс/см²*; между трубками находится газообразный азот под избыточным давлением до 6 *кгс/см²*, являющийся теплоносителем. Конструкция продукционного конденсатора витого типа показана на рис. 8.22. Конденсатор изготовлен цельносварным из стали Х18Н10Т, трубки размером 10×1 *мм*, длина трубок 16 *м*, число 1056 шт.

В установке БР-14 витой выносной конденсатор сварной из алюминиевых сплавов. Для равномерного распределения по всем трубкам жидкого кислорода, поступающего в верхний коллектор, трубная решетка должна быть установлена строго горизонтально, а трубки должны выступать над уровнем решетки на одну и ту же высоту. Каждая трубка снабжается распределителем потока жидкости. В современных установках начинают применяться конденсаторы пластинчаторебристого типа, более компактные и легкие. Конструкция такого конденсатора показана* на рис. 8.23.

Теплопередающую поверхность конденсатора любой конструкции определяют по его тепловой нагрузке, т. е. количеству тепла, которое нужно отвести от кислорода через стенки трубок для конденсации всего количества поступающего в конденсатор азота. Общий коэффициент теплопередачи принимают: для прямотрубных конденсаторов от 600 до 900 *ккал/(м²·ч·град)*; для витых — 800 *ккал/(м²·ч·град)*. К полученной расчетом величине поверхности конденсатора прибавляют 10—15% для учета неточностей расчета, влияния загрязнений и т. п.

Для расчета конденсатора пользуются формулой

$$F = (1,1 - 1,15)\frac{Q}{k\Delta t} \qquad (8.5)$$

где $F$ — поверхность теплообмена, *м²*;
$Q$ — тепловая нагрузка, *ккал/ч*;
$k$ — общий коэффициент теплопередачи, *ккал/(м²·ч·град)*;
$\Delta t$ — температурный напор в конденсаторе, обычно равный 2—3 *град*.

Технические данные конденсаторов приведены в табл. 8.6.

На прочность конденсаторы испытывают в течение 5 *мин* гидравлическим или пневматическим избыточным давлением: трубное пространство — 9 *кгс/см²*, межтрубное — 2 *кгс/см²*, а на плотность — пневматическим избыточным давлением в течение времени, необходимого для осмотра: трубного пространства** — 6 *кгс/см²*, межтрубного — 0,7 *кгс/см²*.

**Ремонт.** Если трубки конденсатора начинают пропускать газ, то азот, находящийся под более высоким давлением, проникает

* В. И. Сухов, В. К. Орлов, С. А. Шевякова, Кислородная промышленность, № 1 (1970).
** В обращенных конденсаторах под более высоким давлением испытывается межтрубное пространство.

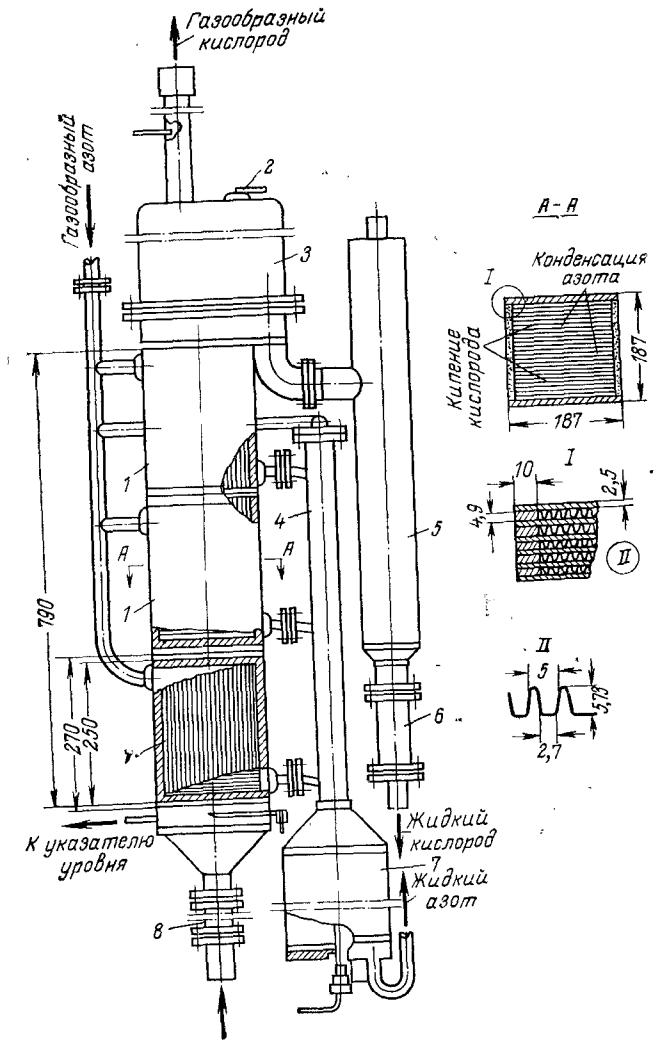



Рис. 8.23. Конденсатор-испаритель пластинчаторебристого типа (опытная модель):

*1* — пакеты конденсатора-испарителя; *2* — электроемкостный уровнемер; *3* — выходной коллектор газообразного кислорода; *4* — выходной коллектор жидкого азота; *5* — отвод жидкого кислорода в циркуляционный контур; *6*, *8* — расходомеры турбинного типа; *7* — сборник жидкого азота.

Таблица 8.6. **Техническая характеристика конденсаторов**

| Установка | Назначение | Количество, шт. | Поверхность одного конденсатора, $м^2$ | Размер трубок, *мм* | Число трубок, шт. | Средняя длина трубок, *мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Прямотрубные из меди М-3, с межтрубным кипением | | | | | | |
| КГН-30 | Основной | 1 | 4,5 | 8×0,5 | 543 | 378 |
| УКГС-100 | То же | 1 | 20,7 | 8×0,5 | 1597 | 580 |
| КГ-300М | » | 1 | 46,0 | 7×0,5 | 3462 | 740 |
| КТ-1000 | » | 1 | 200,0 | 8×0,5 | 8228 | 1100 |
| КтК-35-2 | Верхний, криптоновой колонны | 1 | 50,0 | 8×0,5 | 2083 | 950 |
| КТ-3600 | Основной | 1 | 617,0 | 8×0,5 | 17720 | 1600 |
| | Дополнительный* | 1 | 214,0 | 10×1 | 660 | 13000 |
| Прямотрубные из нержавеющей стали 1Х18Н10Т, с внутритрубным кипением | | | | | | |
| Кт-12-2 | Основной | 3 | 748 | 10×1 | 8088 | 3000 |
| КтА-12-2, КтК-12-1, К-11-1 | Нижний | 1 | 96 | 10×1 | 2100 | 1650 |
| АКт-16-1 | Основной | 2 | 748 | 10×1 | 8088 | 3000 |
| АКт-16-2 | Выносной | 1 | 235 | 10×1 | 5472 | 1500 |
| КА-13,5 | Основной | 2 | 1290 | 10×1 | 15000 | 3000 |
| АКт-17-1 | Основной** | 2 | 680 | 12×1,5 | 5880 | 3000 |
| | Выносной** | 1 | 680 | 12×1,5 | 5880 | 3000 |
| БР-14 | Основной** | 1 | 146 | 12×1,5 | 1356 | 2960 |
| КтК-35-2 | Основной*** | 3 | 1350 | 10×0,5 | 14580 | 3000 |
| | Парлифта | 1 | 300 | 10×1 | 8088 | 1260 |
| | Нижний, криптоновой колонны | 1 | 170 | 10×1 | 3259 | 1660 |

* Витой. ** Из алюминиевого сплава. *** Из меди М-3.

в пространство, занятое кислородом. При значительном пропуске в конденсаторе концентрация кислорода может настолько понизиться, что ее уже не удается восстановить регулированием.

Ремонт конденсатора производят, вынув его из блока разделения. Место пропуска, определенное испытанием конденсатора сжатым воздухом в водяной ванне, запаивают мягким припоем ПОС-40, в сварных конденсаторах — заваривают аргоно-дуговой сваркой. Если пропускают трубки, их заглушают с обоих концов медными пробками и запаивают или заваривают. В новых конденсаторах можно заглушать не более 1,5%, в ремонтируемых — не более 10% общего числа трубок.

После ремонта трубки конденсатора продувают воздухом для просушки, а затем каждую трубку отдельно прочищают проволокой (шомполуют). Особенно нежелательно случайное запаивание нижних концов трубок, так как в запаянной трубке может скопиться влага, которая при пуске аппарата замерзнет и разорвет трубку. После пайки необходимо производить пассивирование (для

предохранения от коррозии остатками флюса) промывкой поверхности конденсатора 10%-ным бескислотным раствором хромпика а затем горячей водой.

## 8.4. РЕКТИФИКАЦИОННЫЕ КОЛОННЫ

Ректификационные колонны бывают насыпные и тарельчатые. Насыпные колонны использовались в аппаратах старой конструкции, небольшой производительности. Они представляют собой латунную трубу (диаметром до 250 *мм*), заполненную насадкой из отрезков латунных трубок диаметром 10 *мм* и длиной 10 *мм* (так называемыми кольцами Рашига). Насыпные колонны работают недостаточно эффективно и сейчас не используются.

В современных воздухоразделительных установках применяются колонны тарельчатого типа различной конструкции.

В зависимости от конструкции тарелок и требуемой концентрации продуктов разделения воздуха количество тарелок в верхней колонне обычно равно 36 или 48 (в некоторых установках 58—60), в нижней колонне 24—36 шт.

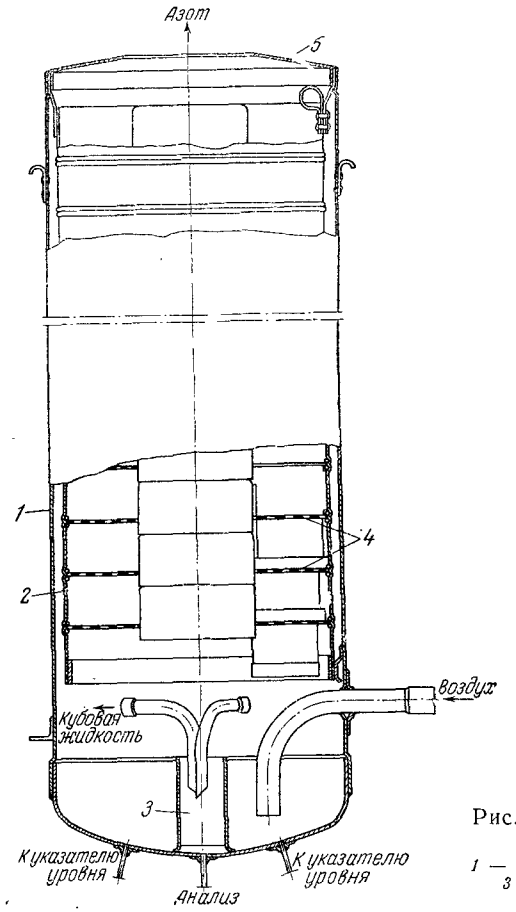



Рис. 8.24. Нижняя колонна кислородного аппарата УКГС-100:
1 — наружная обечайка; 2 — вставка; 3 — стакан; 4 — конус; 5 — тарелки.

Рассмотрим конструкции ректификационных колонн некоторых воздухоразделительных аппаратов.

Нижняя колонна кислородного аппарата УКГС-100 (рис. 8.24) работает под избыточным давлением 5 *кгс/см*². Цилиндрическая наружная обечайка *1* сварена из латуни Л-62 и рассчитана на указанное рабочее давление. Верхняя часть колонны впаивается в конус конденсатора. Внутри обечайки находится тонкостенная медная вставка *2*, между зигами которой укреплены на пайке 24 ректификационные ситчатые тарелки *5* кольцевого типа.

Воздух, вводимый в нижнюю часть (куб) колонны, барботирует через слой жидкого обогащенного воздуха и промывается от

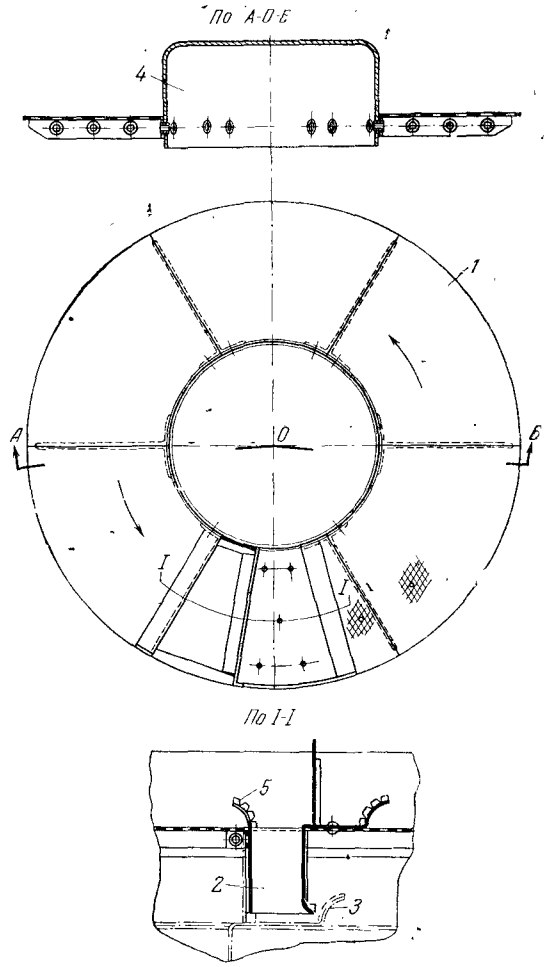



Рис. 8.25. Кольцевая тарелка ректификационной колонны кислородного аппарата УКГС-100:
1 — сектор; 2 — сливной карман; 3 — гидравлический затвор; 4 — колпак; 5 — порожек сливного кармана.

твердой $CO_2$. Кубовая жидкость отводится из вертикального стакана *3*, припаянного к днищу колонны. Сверху колонна частично закрыта конусом *4*, предназначенным для распределения стекающего из конденсатора жидкого азота между азотными карманами и тарелками нижней колонны.

Тарелка колонны состоит из шести секторов *1* (рис. 8.25), склепанных (или сваренных точечной сваркой) между собой по отбортовке. Секторы изготовлены из листовой латуни толщиной

0,8 *мм* и в них пробиты отверстия диаметром 0,9 *мм*, распол- женные по углам ромба с шагом 3,25 *мм**. На 1 $м^2$ размещает- около 110 тыс. отверстий. Каждая тарелка снабжена сливным кар- маном *2*, который располагает над гидравлическим затвором нижележащей тарелки.

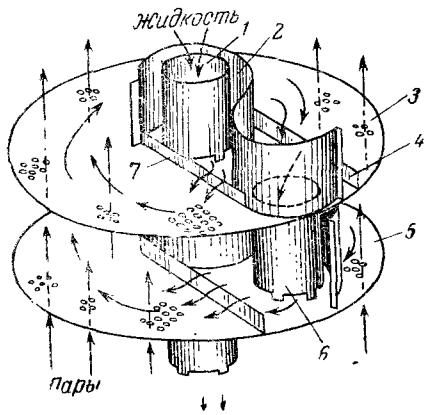



Рис. 8.26. Тарелка S-образная:
*1*, *6* — сливные стаканы; *2* — вертикальная S-образная перегородка; *3*, *5* — тарелки перфорированные; *4*, *7* — порожки.

Центральная часть тарел- закрыта колпаком *4*. Жидкос- стекающая по тарелкам колон- через гидравлические затвор- обходит тарелку в направлен- указанном стрелками, и через п- рожек *5* переливного карма- стекает на нижележащую - релку.

В воздухоразделительных ус- новках применяются исключ- тельно ситчатые тарелки вв- простоты их изготовления.

В некоторых импортных ус- новках используются колпач- вые тарелки, снабженные меди- ми или латунными колпачка- Изготовление таких тарелок зн- чительно сложнее, но особых преимуществ перед ситчатыми они - имеют. Применение их целесообразно только для промывки от С- так как они меньше забиваются твердой $CO_2$.

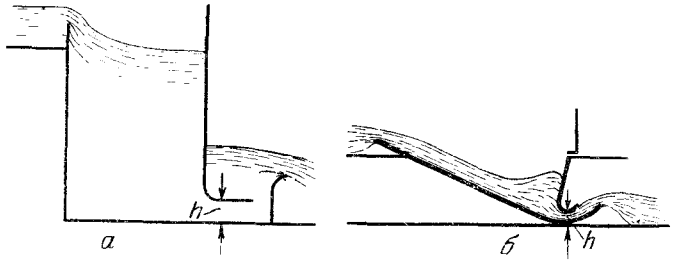



Рис. 8.27. Сливные устройства кольцевых тарелок:
*а* — прямой слив; *б* — наклонный профилированный безударный слив.

Кольцевые тарелки наиболее эффективны; при протекании жи- кости по такой тарелке сохраняется постоянная разность концен- раций азота и кислорода в жидкости на тарелках и в парах, н- ступающих к ней с лежащей ниже тарелки, вследствие чего пл-

* Тарелки колонн крупных установок имеют отверстия диаметром 1,2 *м* при шаге 3,25 *мм*.



щадь тарелки используется более полно, и такие тарелки применяются в современных аппаратах производительностью от 100 $м^3/ч$ кислорода и более.

В ректификационных колоннах небольшого диаметра (200—300 *мм* и менее) применяются S-образные тарелки, при помощи которых (так же как и кольцевых) обеспечивается упорядоченное движение жидкости по тарелке в одном и том же направлении.

Тарелка *3* (рис. 8.26) состоит из перфорированного листа, к которому припаяна вертикальная S-образная перегородка *2*, делящая тарелку на две части.

С верхней тарелки через стакан *1* стекает жидкость и, переливаясь через порожек *7*, движется в направлении, указанном стрелками. На этом пути происходит массообмен жидкости с парами, поднимающимися по колонне через отверстия в диске тарелки.

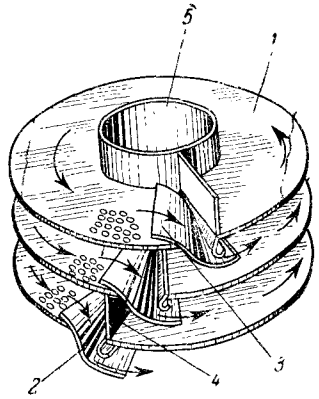



Рис. 8.28. Кольцевые тарелки с профилированными сливными устройствами:
*1* — сетка; *2* — сливные отверстия; *3* — профилированный оток слива; *4* — вертикальная стенка; *5* — внутренний цилиндр.

Подойдя к перегородке *2* с другой стороны, жидкость, обогащенная кислородом, стекает на ниже лежащую тарелку *5* через порожек *4* и сливной стакан *6*, продолжая передвигаться по окружности тарелки *5* в том же направлении. Нижние края переливных стаканов погружены в жидкость, толщина слоя которой на тарелке определяется высотой порожка *7*. Этим на тарелке создается гидравлический затвор, препятствующий прохождению паров через сливные стаканы помимо слоя жидкости.

Конструкция сливного устройства тарелки имеет существенное значение для равномерного и спокойного слива жидкости по тарелкам. Если сливное устройство создает большое сопротивление потоку жидкости, слив с тарелки затрудняется и уровень жидкости на тарелках может повыситься. В этом случае возникает явление, называемое подвисанием жидкости в колонне (захлебывание колонны).

Уменьшив сопротивление переливных устройств, можно соответственно увеличить скорость паров и сократить расстояние между тарелками без опасения, что колонна начнет захлебываться в рабочем режиме. Для аппаратов производительностью до 100 $м^3/ч$ при скорости пара в колонне до 0,2 *м/сек* обычно применяют прямые сливные устройства (рис. 8.27, *а*), для более крупных аппаратов — наклонные профилированные (рис. 8.27, *б*).

Захлебывание колонны может наступить также в том случае, если высота *h* сливной щели (см. рис. 8.27) недостаточна. На рис. 8.28 показано устройство однопоточных кольцевых ситчатых

тарелок с профилированными безударными сливными устройства ми. Тарелки большого диаметра (свыше 2500 *мм*) изготовляют с двумя сливами, расположенными на противоположных сторонах окружности тарелки, или с тремя сливами под углом 120°С друг к другу для равномерного распределения жидкости на тарелке.

Верхняя колонна воздухоразделительного аппарата установки УКГС-100 работает при избыточном давлении 0,4—0,5 *кгс/см²*.

В тонкостенной медной зигованной обечайке *1* (рис. 8.29) размещено 36 кольцевых тарелок *2*, конструкция которых аналогична изображенной на рис. 8.25. Верхняя часть колонны закрыта крышкой *3* и имеет лабиринтный сепаратор *4* для отделения от газообразного азота капелек уносимой жидкости. Нижняя часть колонн впаяна в конденсатор. Кубовая жидкость подается на 24-ю тарелку (считая снизу). Отходящий азот отводится в теплообменник и трубе *5*. В крупных воздухоразделительных аппаратах применяются тарелки ректификационных колонн большого диаметра и для крепления их приходится ставить две зигованные обечайки: внутреннюю и наружную.

В нижних колоннах эти обечайки вставляются в цилиндрический корпус, рассчитанный на рабочее давление колонны. Снизу к корпусу колонны наглухо приварено сферическое днище, а сверху — фланец, к которому присоединяется на болтах верхняя сферическая крышка. Такую конструкцию имеет, например, нижняя колонна блока разделения воздуха установки БР-1 (рис. 8.30).

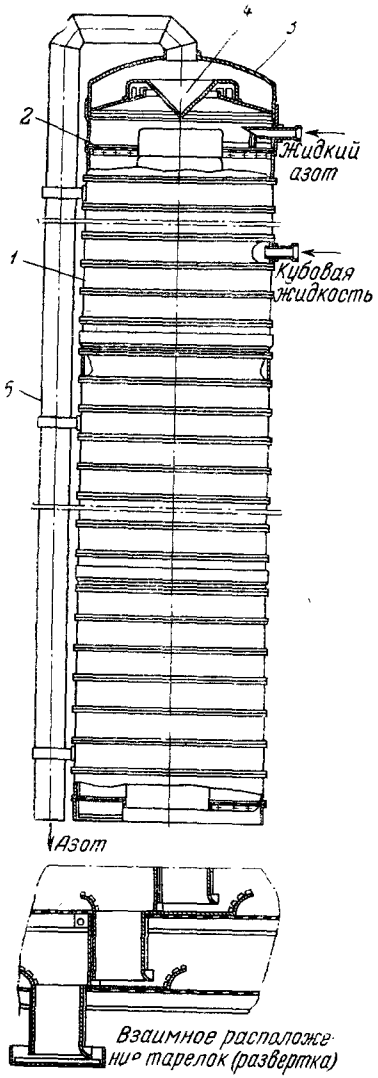



Рис. 8.29. Верхняя колонна кислородного аппарата УКГС-100:
*1* — обечайка; *2* — кольцевая тарелка; *3* — крышка; *4* — лабиринтный сепаратор; *5* — труба для отвода азота.

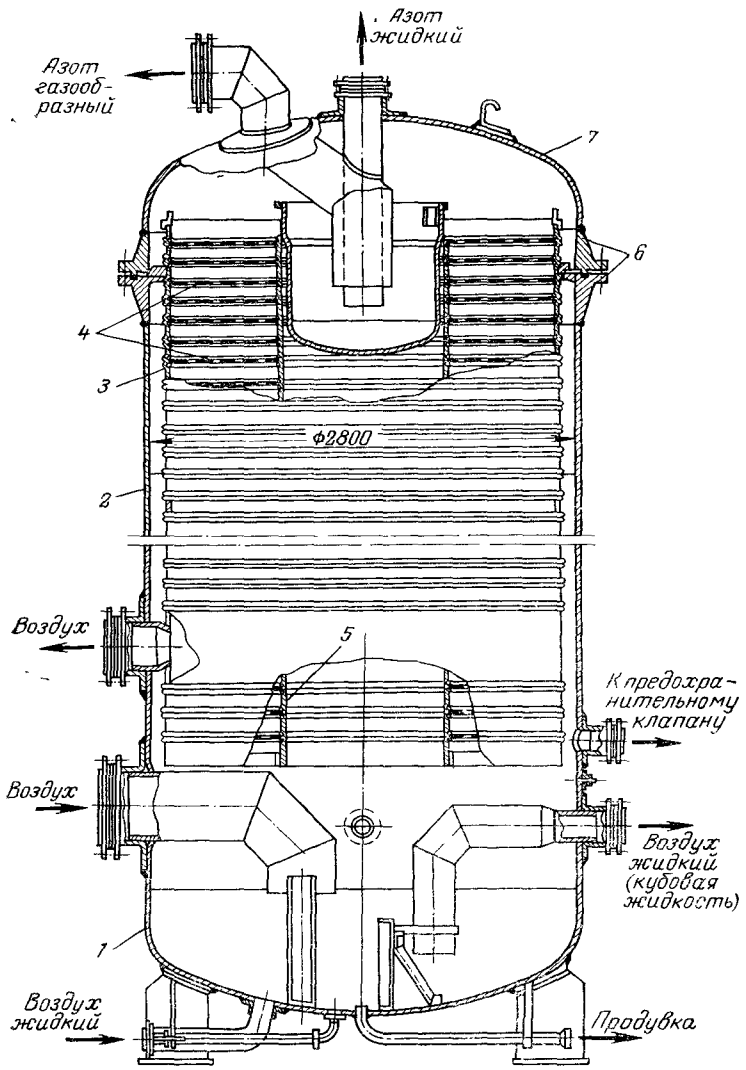



Рис. 8.30. Нижняя колонна блока БР-1:
*1* — днище; *2* — корпус; *3* — наружная обечайка; *4* — тарелки; *5* — внутренняя обечайка; *6* — фланцы; *7* — крышка.

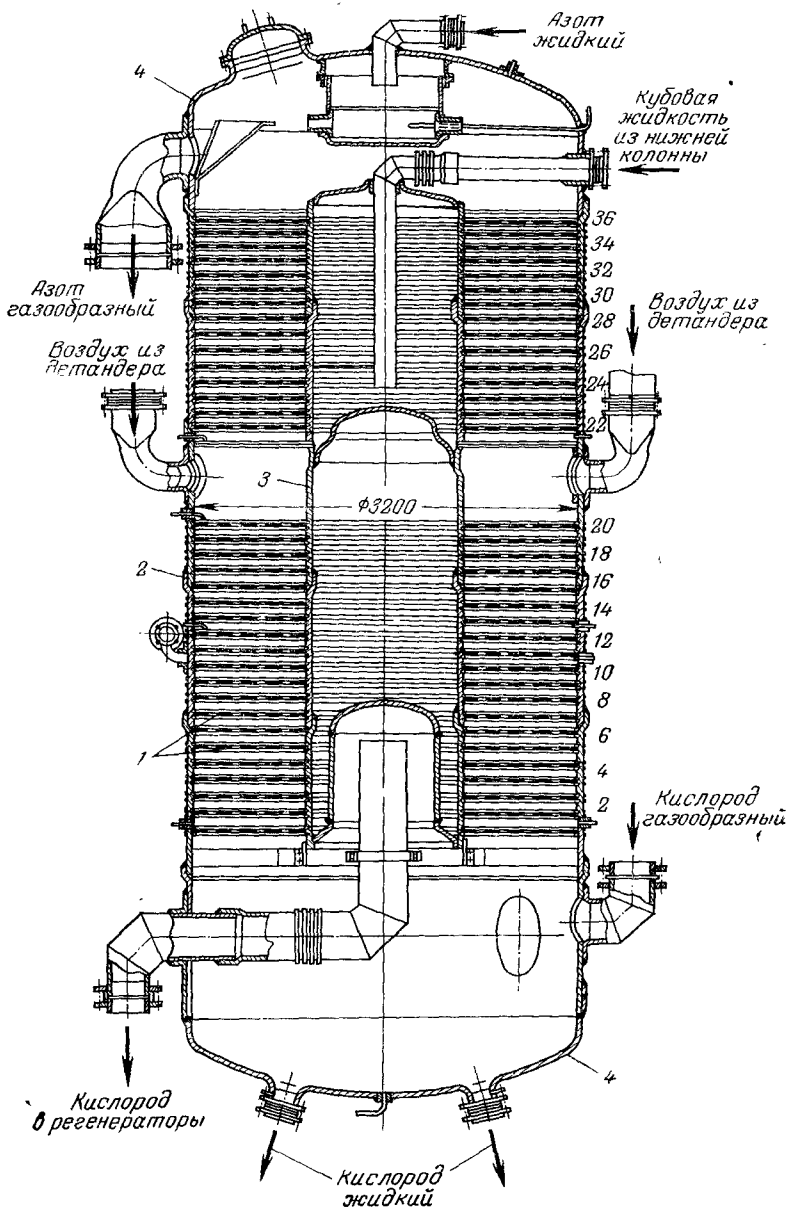



Рис. 8.31. Верхняя колонна блока БР-1:

*1* — тарелки; *2* — наружная обечайка; *3* — внутренняя обечайка; *4* — днища. Цифры справа — номера тарелок, считая снизу.

На рис. 8.31 показана верхняя колонна блока разделения воздуха установки БР-1, у которой тарелки *1* впаяны в две обечайки: наружную *2* и внутреннюю *3*. Наружная обечайка имеет два впаянные днища *4*. Верхняя колонна блока БР-1 имеет 36 тарелок,

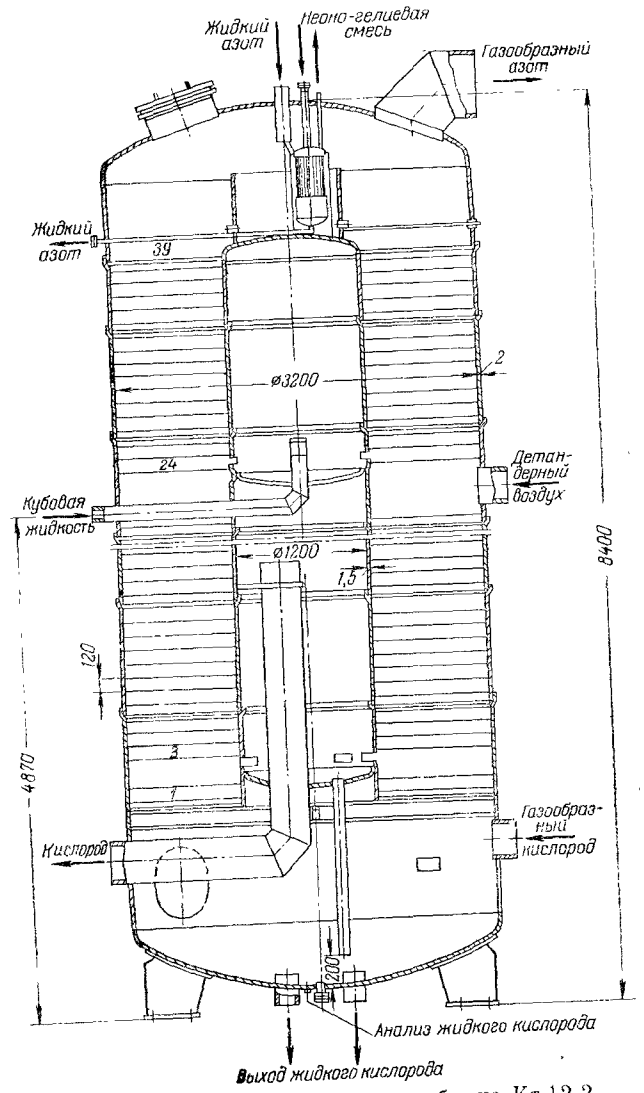



Рис. 8.32. Верхняя колонна блока Кт-12-2.

нижняя — 24 и 3 добавочных тарелки, на которых жидкий воздух отмывается от двуокиси углерода.

В новых блоках разделения воздуха ректификационные колонны изготовляют цельносварными: для установки БР-14 — из алю-

миниевого сплава АМг-5 аргоно-дуговой сваркой, а для более крупных блоков (Кт-12-2 и др.) — из нержавеющей стали Х18Н10Т или Х14Г14Н3Т. Тарелки крепятся в обечайках с помощью профильных колец, вставляемых в зиги обечаек и привариваемых к ним точечной сваркой. От вертикального перемещения тарелки закрепляются прижимными кольцами, также приваренными к обечайке точечной сваркой.

На рис. 8.32 в качестве примера цельносварной колонны из нержавеющей стали показана верхняя колонна блока Кт-12-2. Тарелки изготовлены из латуни. Газообразный кислород отбирают не из сборника, а со 2-й тарелки, для уменьшения потерь криптона-ксенона, растворенного в жидком кислороде. В верхней части колонны установлена трубчатка — концентратор неоно-гелиевой смеси. Колонна имеет 39 двухсливных тарелок.

Диаметры ректификационных колонн нормализованы. Техническая характеристика ректификационных колонн воздухоразделительных аппаратов приведена в табл. 8.7.

Основные неполадки при работе ректификационных колонн — это пропуск в местах пайки, что проявляется промерзанием в этом месте изоляции аппарата и появлением на кожухе снеговых пятен. Обнаруженные неплотности исправляют пайкой мягким припоем марки ПОС-40 при очередном ремонте аппарата. Нарушение герметичности в месте крепления тарелки к обечайке может привести к ухудшению процесса ректификации, выражающемуся обычно в снижении чистоты отходящего азота. Это становится особенно заметным, когда по каким-либо причинам несколько тарелок выходят из пазов, оседают или перекашиваются. В таком случае необходимо демонтировать аппарат, распаять колонну, вновь установить тарелки и тщательно пропаять их по всей окружности.

Колонны необходимо устанавливать строго вертикально, чтобы тарелки находились строго горизонтально. Диаметр колонны рассчитывают по средней условной скорости паров в ней. Скорость жидкости в сливном устройстве принимают 0,15—0,3 *м/сек*, расстояние между тарелками от 60 до 160 *мм*.

Верхние ректификационные колонны подвергают пневматическому испытанию на прочность при избыточном давлении 1—1,7 *кгс/см*$^2$ в течение 5 *мин* и на герметичность при избыточном давлении 0,7 *кгс/см*$^2$ в течение времени, необходимого для осмотра. При этом не должно наблюдаться деформации колонны. Герметичность колонны определяется погружением ее в воду или обмыливанием. Обечайки нижних колонн подвергают гидравлическому испытанию на прочность при давлении, на 25% превышающем величину рабочего давления, и на герметичность — пневматическому испытанию при рабочем давлении*. Если нижняя колонна собрана

* Правилами Госгортехнадзора разрешается не производить гидравлических испытаний воздухоразделительных аппаратов (нижних колонн, конденсаторов и пр.) при очередных освидетельствованиях, производимых в установленные Правилами сроки.



Таблица 8.7. **Технические данные ректификационных колонн**

| Установки | Тип тарелки | Диаметр тарелки (наружный/внутренний), *мм* | Расстояние между тарелками, *мм* | Число тарелок, шт. | Скорость паров, *м/сек* |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Нижние колонны** | | | | |
| КГН-30 | S-образная | 220 | 60 | 18 | 0,05 |
| УКГС-100 | Кольцевая | 400/170 | 80 | 20 | 0,07 |
| КГ-300М | » | 540/230 | 80 | 24 | 0,07 |
| КТ-1000М | » | 1000/404 | 90 | 24 | 0,1 |
| Кт-12-2; КтА-12-2; КтК-12-1; | Двухсливная с профильными карманами | 2600/1000 | 120 | 25 | 0,2 |
| К-11-1 | То же | 2200/800 | 110 | 38 | 0,135 |
| Акт-16-1; АКт-16-2 | » | 1700/700 | 100 | 23 | 0,173 |
| Кт-5-2 | Трехсливная с профильными карманами | 2800/1120 | 130 | 36 | 0,24 |
| АКт-17-1 | Односливная с профильным карманом | 1000/400 | 90 | 16 | 0,17 |
| БР-14 | Трехсливная с профильными карманами | 3600/1200 | 160 | 32 | 0,27 |
| КтК-35-2 | | | | | |
| | **Верхние колонны** | | | | |
| КГН-30 | S-образные | 290 | 60 | 36 | 0,12 |
| УКГС-100 | Кольцевые | 500/216 | 80 | 36 | 0,22 |
| КГ-300М | » | 700/292 | 80 | 36 | 0,23 |
| КТ-1000М | » | 1200/498 | 90 | 36 | 0,3 |
| Кт-12-2; КтА-12-2 | Двухсливная с профильными карманами | 3200/1200 | 120 | 39 | 0,35 |
| КтК-12-1 | То же | 3200/1200 | 120 | 43 | 0,3—0,35 |
| К-11-1 | Трехсливная с профильными карманами | 3200/1200, в. с.* | 130 | 40 | 0,3—0,46 |
| | | 2800/1200, н. с. | 130 | 40 | 0,3—0,46 |
| Кт-5-2 | Двухсливная с профильными карманами | 2200/800, в. с. | 90 | 34 | 0,4 |
| | | 1700/700, н. с. | 100 | 34 | 0,4 |
| АКт-16-1; АКт-16-2 | То же | 1900/800, в. с. | 120 | 30 | 0,3—0,37 |
| | | 2600/1000, с. с. | 120 | 30 | 0,3—0,37 |
| | | 2200/800, н. с. | 110 | 30 | 0,3—0,37 |
| АКт-17-1 | Трехсливная с профильными карманами | 2800/1120 | 130 | 36 | 0,46—0,49 |
| БР-14 | Односливная с профильным карманом | 1200/500, в. с. | 90 | 46 | 0,34—0,43 |
| | | 1000/400, н. с. | 90 | 46 | 0,34—0,43 |
| КтК-35-2 | Двухсливная с профильными карманами | 1900/800 | 90 | 18 | 0,32 |
| | Односливная с профильным карманом | 850/368 | 90 | 15 | 0,35 |

* Условные обозначения: в. с.—верхняя секция; с. с.—средняя секция; н. с.—нижняя секция.

*Продолжение*

| Установки | Тип тарелки | Диаметр тарелки (наружный/внутренний), *мм* | Расстояние между тарелками, *мм* | Число тарелок, шт | Скорость паров, *м/сек* |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Криптоновые колонны** | | | | |
| Кт-12-2; К-11-1; КтК-12-1 КтА-12-2 КтК-35-2 | Односливная с прямым карманом | 700/290 | 80 | 22 | 0,37 |
| | То же | 1000/400 | 90 | 22 | 0,35 |
| | Двухсливная с профильным карманом | 1900/800 | 90 | 18 | 0,32 |
| | Односливная с профильным карманом | 850/368 | 90 | 15 | 0,35 |
| | **Азотные колонны** | | | | |
| Кт-12-1; КтК-12-1 Кт-5-2 КтА-12-2 КА-13,5 | Односливная с профильным карманом | 400/170 | 80 | 14 | 0,17 |
| | То же | 400/170 | 80 | 8 | 0,17 |
| | » | 1200/500 | 90 | 21 | 0,13 |
| | » | 850/368 | 90 | 17 | 0,21 |
| | **Колонны технического кислорода** | | | | |
| АКт-16-2 | Односливная с прямым карманом | 470/240 | 80 | 28 | 0,25 |
| КтК-35-2 | Двухсливная с профильным карманом | 2600/1000 | 120 | 24 | 0,31 |
| | **Колонна сырого аргона** | | | | |
| КАр-30 | Двухсливная с профильным карманом | 2800/1120 | 130 | 53 | 0,24—0,29 |

вместе с конденсатором, допускается ее испытание на прочность пневматически при избыточном давлении 9 *кгс/см²* в течение 5 *мин*, а затем на герметичность пневматически при избыточном давлении 6 *кгс/см²*.

## 8.5. АДСОРБЕРЫ АЦЕТИЛЕНА

Адсорберы заполняются адсорбентом (силикагелем) для очистки перерабатываемого воздуха от ацетилена поглощением его при низких температурах.

На рис. 8.33 показан адсорбер ацетилена установки БР-14, изготовленной из алюминиевого сплава АМц-М аргоно-дуговой сваркой. Корпус *1* соединен с крышкой *2* болтами, стягивающими фланцы корпуса и крышки. Между ними зажат фланец *4* корзины *3* с адсорбентом *11*. Сверху адсорбент сжимает плавающая решетка *5*, уплотненная сальниковой набивкой *6* и снабженная прижим-



ным кольцом *7*. Сила нажатия создается пружинами *9*, одетыми на шпильки *8* и упирающимися в неподвижную опорную решетку *10*. Удельное давление на адсорбент 0,3 *кгс/см²*, что компенсирует его осадку вследствие истирания. Рабочее давление (избыточное) адсорбера 6 *кгс/см²*.

Поступающий снизу жидкий обогащенный воздух из нижней колонны проходит через отверстия в дне корзины и через слой силикагеля. При этом воздух очищается от растворенного в нем ацетилена. Для удержания пыли адсорбента между ним и перфорированными дисками корзины укладывают латунную сетку по ГОСТ 3187—65: № 24 на входе жидкости и № 68 на выходе.

В установках производительностью до 100 *м³/ч* обычно имеется один адсорбер. Более крупные разделительные аппараты снабжены двумя адсорберами, работающими попеременно. Наличие в адсорбере съемной корзины значительно упрощает замену адсорбента.

В современных установках, особенно большой производительности, применяют адсорберы, выполненные в виде полностью заваренных аппаратов с двумя приваренными сферическими днищами. Материал — нержавеющая сталь Х18Н10Т. Такая конструкция проще, дешевле и более надежна в отношении сохранения полной герметичности аппарата в процессе работы. Адсорберы устанавливают на потоках кубовой жидкости и газообразного воздуха после регенераторов (для очистки от ацетилена прямого и нетлевого воздуха), а также в циркуляционном контуре жидкого

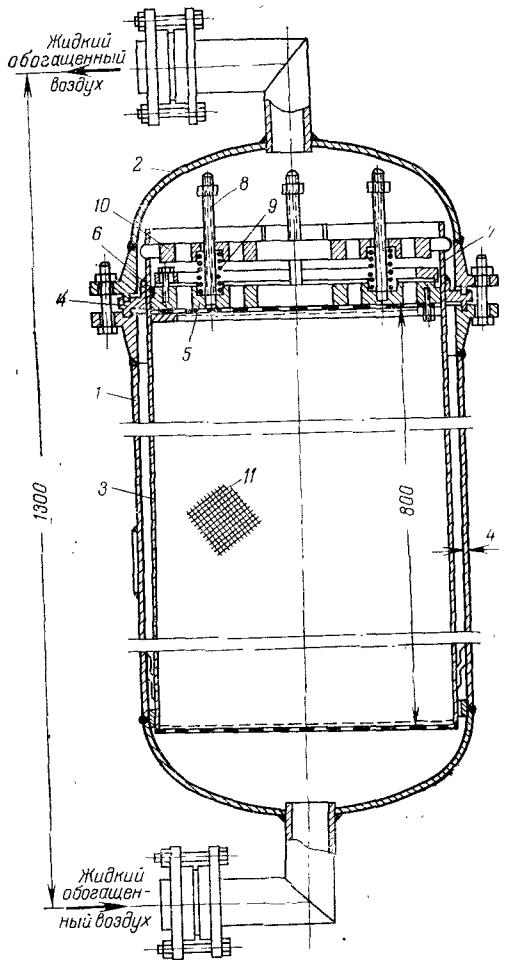



Рис. 8.33. Адсорбер ацетилена установки БР-14:

*1* — корпус; *2* — крышка; *3* — корзина; *4* — фланец; *5* — плавающая решетка; *6* — сальниковая набивка; *7* — прижимное кольцо; *8* — шпильки; *9* — пружины; *10* — опорная решетка; *11* — абсорбент.

кислорода. В качестве адсорбента применяется кусковой* силикагель марки КСМ (ГОСТ 3956—54*), содержащий не более 2% влаги, объемный вес не более 0,67 *кг/дм*³. Объемная скорость азота или воздуха при регенерации адсорбента не должна превышать 250—300 *дм*³/*мин* во избежание истирания и измельчения зерен силикагеля.

Указания по обслуживанию и режиму работы адсорберов приведены в гл. 14.

При расчете жидкостного адсорбера принимают высоту слоя адсорбента не менее 900 *мм*. Скорость жидкости в адсорбере должна быть: для установок с одним адсорбером — 0,02—0,025 *см*³/*мин*, с двумя адсорберами — 50—60 *см*³/*мин* на 1 *см*² свободной (без учета объема адсорбента) площади сечения адсорбера. При этих условиях, если концентрация ацетилена в засасываемом воздухе равна 0,1 *см*³/*м*³, один адсорбер может обеспечивать полную очистку воздуха от ацетилена в течение 25 суток непрерывной работы, а два адсорбера — по 15 суток каждый.

Принимается, что поглотительная способность 1 *дм*³ силикагеля КСМ составляет 2—2,5 *дм*³ $C_2H_2$ в динамических условиях.

Концентрация ацетилена 0,1 *см*³/*м*³ воздуха соответствует концентрации ацетилена 0,2 *см*³/*дм*³ кубовой жидкости. При более высоком содержании ацетилена адсорбер также может продолжать работать, но при соответствующем сокращении периода работы между остановками на регенерацию адсорбента.

В табл. 8.8 приведена техническая характеристика адсорберов различных установок.

Скорость прохождения газа в газовом адсорбере принимается не более 95 *см*³/*мин* на 1 *см*² площади сечения (считая по диаметру обечайки адсорбера при рабочих условиях среды).

Способ адсорбции ацетилена в жидкой фазе применяется для очистки жидкого кислорода, по какой-либо причине загрязненного ацетиленом. Однако при этом необходимы дополнительные меры предосторожности для исключения возможности взрыва в адсорбере твердого ацетилена или продуктов крекинга масла, если они присутствуют в жидком кислороде. Указанные вещества, не будучи адсорбированы силикагелем, могут накопиться в свободном пространстве адсорбера и послужить причиной его взрыва при наличии соответствующего импульса (искры, гидравлического удара, детонации и пр.). Расчетная скорость жидкости в адсорберах для очистки жидкого кислорода принимают 50—60 *см*³/*мин* на 1 *см*² площади сечения вставки (т. е. без учета объема адсорбента). Высота слоя адсорбента — от 500 до 1500 *мм*.

Для базовых технологических схем установок низкого давления ВНИИкриогенмаш разработал типовой ряд унифицированных адсорберов на жидкостном и газовом потоках.

* Для газофазных адсорберов разрешается использовать гранулированный силикагель КСМ.



Таблица 8.8. **Техническая характеристика адсорберов ацетилена**

| Установки | Число адсорберов, шт. | Размеры, *мм* | | Масса адсорбента, *кг* |
|---|---|---|---|---|
| | | внутренний диаметр | высота слоя адсорбента | |
| **Адсорберы на потоке кубовой жидкости** | | | | |
| КГН-30 | 1 | 110 | 470 | 3 |
| УКГС-100 | 1 | 150 | 900 | 11 |
| КГ-300М | 2 | 250 | 700 | 28 |
| КТ-1000М | 2 | 400 | 750 | 67 |
| КЖ-1 | 2 | 400 | 750 | 67 |
| Кт-12-2; КтА-12-2; КтК-12-1; К-11-1 | 2 | 1200 | 980 | 660 |
| Кт-5-2 | 2 | 750 | 750 | 450 |
| АКт-16-1; АКт-16-2 | 2 | 1100 | 980 | 900 |
| АКт-17-1 | 2 | 1700 | 1500 | 3600 |
| БР-14 | 2 | 400 | 800 | 160 |
| КтК-35-2 | 2 | 1900 | 1660 | 4000 |
| **Адсорберы на потоке жидкого кислорода** | | | | |
| Кт-12-2 КтА-12-2 КтК-12-1 К-11-1 | 2 | 400 | 800 | 160 |
| Кт-5-2; КА-13,5 | 2 | 550 | 800 | 175 |
| АКт-16-1; КтК-35-2 | 1 | 700 | 500 | 250 |
| АКт-17-1 КтА-33 КАр-30 | 2 | 800 | 1500 | 830 |
| **Адсорберы газофазные на потоке воздуха после регенераторов** | | | | |
| КтА-33; КАр-30 | 2 | 3000 | 2400 | 18000 |
| **Адсорберы газофазные для очистки воздуха от двуокиси углерода** | | | | |
| АКт-16-2 | 2 | 1700 | 2400 | 5000 |
| КтА-33 | 2 | 2400 | 3300 | 12300 |

Диаметры адсорберов типового ряда (в *мм*):

| Тип | | Тип | |
|---|---|---|---|
| Жидкостные, типов | | Газовые, типов | |
| I | 200—400 | IV | 800—1700 |
| II | 600—1700 | V | 2000—3600 |
| III | 2000—3000 | | |

Адсорберы типового ряда изготовляют из нержавеющей стали, они рассчитаны на силикагель КСМ и обеспечивают подбор адсорберов в пределах типового ряда установок низкого давления.

На рис. 8.34 показан газофазный сварной адсорбер из нержавеющей стали Х18Н10Т установки КтА-33; он рассчитан на рабочее

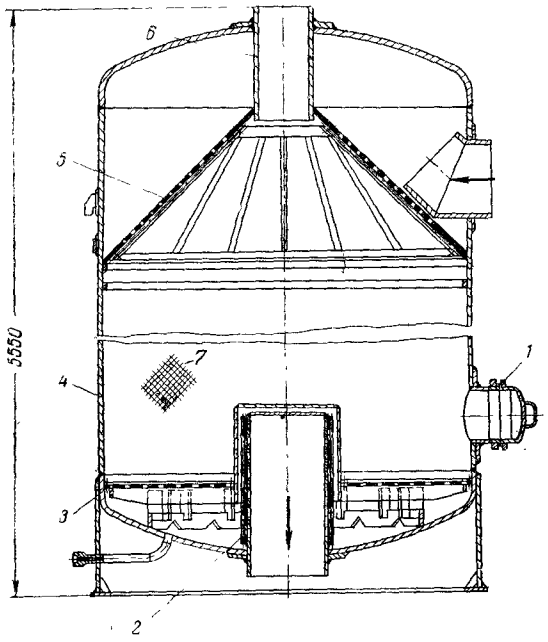



Рис. 8.34. Газофазный адсорбер установки КтА-33:

*1* — люк; *2* — сетчатый фильтр; *3* — решетка; *4* — корпус; *5* — решетка входная; *6* — труба с силикагелем; *7* — силикагель.

давление 6 *кгс/см*$^2$ (избыточное). Труба *6* заполнена силикагелем, высота около 2 *м*, что обеспечивает постоянное уплотнение адсорбента в адсорбере.

## 8.6. ФИЛЬТРЫ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА

Фильтры для улавливания $CO_2$ применяются в установках, имеющих регенераторы с насадкой из алюминиевой ленты, и служат для очистки жидкого воздуха от твердой углекислоты*.

В установках выпуска последних лет для очистки воздуха от твердых частиц $CO_2$, масла, графитовой пыли и других примесей применяются фильтры из пористого металла**, имеющие фильтрующие элементы различной формы и размеров. Фильтры из пористого металла отличаются большой прочностью, легко очищаются от загрязнений продувкой или промывкой растворителем и могут служить длительное время. В таком фильтре-адсорбере установки БР-5 имеется 108 парных конусообразных трубок из пористой бронзы (рис. 8.35).

* При использовании каменной насадки в регенераторах, а также при очистке воздуха цеолитами содержание $CO_2$ в выходящем воздухе очень мало и составляет 1—3 *см*$^3$/*м*$^3$ воздуха, что ниже предела растворимости $CO_2$ в воздухе. Поэтому в таких установках фильтры не применяются.

** Г. Ф. Денисенко, Методика расчета фильтров из пористой бронзы. Труды ВНИИКИМАШ, вып. 3, Машгиз, 1960.



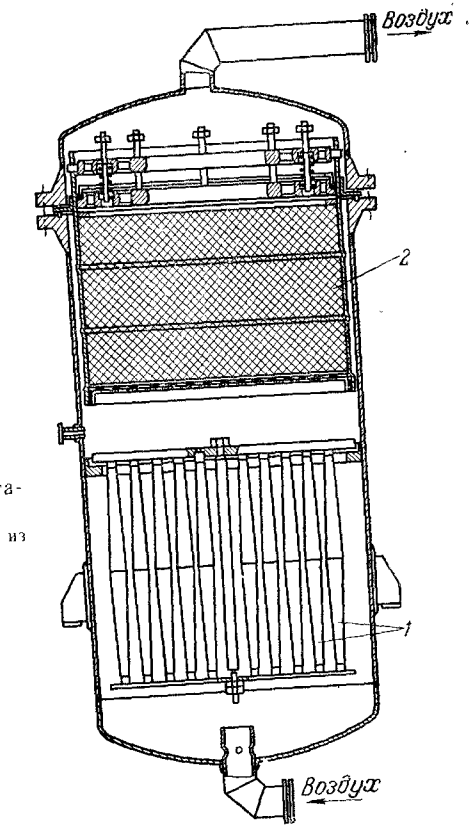



Рис. 8.35. Фильтр-адсорбер установки БР-5:

*1* — фильтрующие элементы (трубки) из пористой бронзы; *2* — силикагель.

Наиболее употребительны следующие фильтрующие элементы (в *мм*):

| | |
|---|---|
| Цилиндры сплошные | |
| диаметр | 10 |
| высота | 10 |
| Диски | |
| диаметр | 50 |
| толщина | 4—10 |
| Конусные трубки | |
| наружный диаметр | |
| верхний | 35 |
| Конусные трубки | |
| наружный диаметр | 46 |
| нижний | 100 и 300 |
| высота | 3—5 |
| толщина стенки | |
| Тарельчатые диски | |
| диаметр | 200 |
| размер отверстий (диаметр) | 60 |
| высота борта | 19 |
| толщина | 4—5 |

Пористость применяемых бронзовых фильтров составляет 36—38%, объемная масса — 5,4—5,8 *г/см³*, толщина стенок 3—5 *мм*. Поверхность фильтрации подсчитывается по формуле

$$F = \frac{Q}{w} \qquad (8.6)$$

где $Q$ — пропускная способность фильтра, *м³/ч*;
$w$ — скорость фильтрации, *м³/(ч·м²)*.

Скорость фильтрации $w$ и другие данные, необходимые для расчета фильтров из пористой бронзы, приводятся ниже:

| | Средний размер пор, *мкм* | Размер частиц загрязнений, *мм* | Скорость фильтрации $w$, *м³/(ч·м²)* |
|---|---|---|---|
| Очистка газов от пыли: в гигрометрах, после блоков осушки, перед турбодетандерами, перед редукторами | 100—150 | 0,30—0,45 | 1000—2000 |
| Очистка жидкого кислорода от графитовой пыли после насосов | 40—80 | 0,10—0,20 | 10—50 |
| Очистка жидкого воздуха от твердой $CO_2$ | 50—100 | 0,15—0,30 | 10—20 |

Цилиндры используются для малых потоков фильтруемого вещества; фильтры большой пропускной способности представляют собой наборы фильтрующих элементов из конусных трубок или тарельчатых дисков, соединенных на пайке свинцово-оловянистым припоем, на резьбе или плотной посадке. Места соединения фильтрующих элементов с корпусом уплотняются пайкой, посадкой или с помощью мягких прокладок из асбеста, кожи и другого материала.

С точки зрения удобства очистки фильтра поток фильтруемого вещества подводится к наружной поверхности трубок (при очистке от твердых частиц $CO_2$), а при очистке от масла — внутрь трубок, поскольку масло оседает на стороне выхода потока из фильтрующего элемента.

## 8.7. ИЗОЛЯЦИЯ БЛОКОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Для тепловой изоляции блоков применяется минеральная вата как наиболее дешевый материал.

Минеральная вата (ГОСТ 4640—66) представляет собой изоляционный негорючий материал, состоящий из тончайших стеклоовидных нитей, получаемых путем распыления жидкого расплава шихты из металлургических и топливных шлаков, а также горных пород и других силикатных материалов. Она выпускается трех марок: 100, 150 и 200. Марка ваты определяет ее объемную массу, которая соответственно равна 100, 150 и 200 *кг/м³* при нагрузке 0,02 *кгс/см²*; диаметр волокон 10 *мкм*. Для изоляции воздухоразделительных аппаратов следует применять вату марки 150 или в крайнем случае марки 200. Влажность ваты не должна превышать 2%, содержание стеклянных шариков (корольков) размером свыше 0,5 *мм* — не более 10% для марки 150 и не более 20% для марки 200; коэффициент теплопроводности в высушенном до постоянной массы состоянии при температуре 30 °С не выше 0,04 *ккал/(м·ч·град)* [0,046 *вт/(м·град)*] для марки 150 и 0,045 *ккал/(м·ч·град)* [0,052 *вт/(м·град)*] для марки 200.

При температуре —150 °С коэффициент теплопроводности минеральной ваты равен:

| Плотность, *кг/(м³)* | Коэффициент теплопроводности, *ккал/(м·ч·град)* | *вт/(м·град)* |
|---|---|---|
| До 200 | 0,034 | 0,040 |
| » 300 | 0,019 | 0,022 |
| » 400 | 0,023 | 0,027 |

Для предотвращения пылеобразования в минеральную вату вводят до 1% масла, битума и других замасливателей. По данным ВНИИкриогенмаша, для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности при изоляции блоков разделения воздуха допускается использование ваты, содержащей до 0,45% масла или до 1% глицерина*.

Цвет ваты — белый, светло-зеленый или светло-коричневый, теплоемкость 0,14 *ккал/(кг·град)*. Вату следует хранить в сухом месте и защищать от увлажнения и уплотнения.

Для изоляции блоков разделения различных установок требуются следующие количества ваты (в *т*):

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Установка | КГН-30 | УКГС-100 | К-0,4 | КТ-1000М | |
| Количество ваты | 1,5 | 3 | 5 | 18 | |
| Установка | ГЖА-2000 | КЖ-1,6 | К-1,4 | Кт-5 | АКт-16 |
| Количество ваты | 26 | 40 | 75 | 150/30* | 400 |
| Установки | Кт-12, КтА-12, К-11 | АКтК-16 | | КтК-35 | |
| Количество ваты | 340 | 600 | | 625 | |

* Числитель—основной блок, знаменатель—дополнительный блок.

Более эффективным изоляционным материалом является вата СТВ (супертонкое волокно), имеющая волокна диаметром 2 *мкм*, плотность без нагрузки 8—12 *кг/м³*. Уплотняется до 50—60 *кг/м³*. В этих условиях при 190 °К коэффициент теплопроводности составляет 0,02 *ккал/(м·ч·град)* [0,023 *вт/(м·град)*].

Для установки ГЖА-2000М потребовалось всего 4 *т* ваты СТВ вместо 40 *т* обычной минеральной ваты.

Для изоляции некоторых аппаратов (детандерные теплообменники, адсорберы, выносные конденсаторы, верх верхней колонны),

* Б. А. Иванов, А. С. Мелихов, А. С. Розовский, Кислородная промышленность, № 1 (1970).

а также арматуры и отдельных трубопроводов применяется обмот ка их стеклянным волокном (ГОСТ 5174—49) с закреплением по следнего проволокой. Толщина слоя изоляции из стекловолокн берется в пределах от 30 до 80 *мм*. Трубопроводы изолируют так же матами и полосами из стекловолокна (ГОСТ 2245—43*). Об емная масса стекловолокна при нагрузке 0,02 *кгс/см*² равн 130 *кг/м*³, матов — 100—170 *кг/м*³ и полос — 120—200 *кг/м*³.

При заполнении кожуха блока минеральной ватой важно со блюдать определенную плотность набивки. Объясняется это тем что минеральная вата, как и всякий пористый материал, погло щает влагу из атмосферного воздуха, что ухудшает изоляционны свойства ваты (влага достаточно хороший проводник тепла). На пример, если вата впитает до 30% влаги от собственного веса коэффициент теплопроводности ее возрастает в 4 раза. При уве личении плотности набивки ваты в кожухе уменьшается возмож ность образования в ней конвекционных токов воздуха, вследст вие чего она меньше увлажняется и ее изоляционные свойств заметно не снижаются.

Наилучшая изоляция достигается при набивке ваты до плот ности 300—350 *кг* в 1 *м*³ объема кожуха.

Влажную и осевшую изоляцию нужно своевременно заменят новой. При значительном увлажнении изоляции увеличивает продолжительность пуска аппарата, так как при охлаждении тр буется дополнительная затрата холода на превращение вла в лед. При каждом ремонте кислородного аппарата в кожух долж на закладываться и тщательно трамбоваться сухая минеральна вата.

Категорически запрещается применять в качестве изоляцион ного материала органические вещества (шерсть, войлок и пр.) вви ду их легкой воспламеняемости и взрывоопасности при насыщ нии жидким или газообразным кислородом.

Кожух блока разделения изготовляется из стали и составляет из отдельных щитов, собираемых на резиновых прокладках. В со ответствующих местах кожуха предусматриваются люки для обес печения доступа к аппаратам и арматуре блока и для выгрузки изоляционного материала.

Одно время для крупных воздухоразделительных блоков при меняли двухстенные кожухи. Это уменьшало количество шлаковой ваты, вынимаемой при ремонтах, и облегчало доступ к аппаратур и трубопроводам. Однако в современных блоках разделения возду ха широко применяются аппараты и внутриблочные коммуника ции из нержавеющей стали и алюминиевые сплавы. Кроме того эти аппараты делаются цельносварными без фланцевых соедине ний. Все это повышает надежность и герметичность соединений работающих при низких температурах, и сокращает необходимост периодического доступа к ним для ремонта. Поэтому в последую щие годы отказались от двухстенных кожухов, обладавших рядом недостатков (повышенный расход металла, сложность уплотнения,



теплоприток через тепловые мосты и др.) и стали применять одно стенные цельносварные кожухи. В качестве изоляции в них исполь зуется минеральная вата или перлит. Обладая более низким коэф фициентом теплопроводности, меньшим объемным весом и лучшей сыпучестью по сравнению с минеральной ватой, перлит уменьшает холодопотери через изоляцию и облегчает условия труда при засыпке изоляции в кожух.

При применении перлита в качестве изоляции блоков разде ления воздуха вся холодная арматура размещается в специальных отсеках, отделяющих ее от пространства, заполненного перлитом. Эта арматура в отсеках изолируется минеральной ватой, что об легчает доступ к ней при ремонтах. Минеральной ватой и супертон ким стекловолокном изолируют также блоки детандеров и порш невых насосов. Техническая характеристика перлита дана в гл. 10.

ГЛАВА 9

# ТРУБОПРОВОДЫ И АРМАТУРА КИСЛОРОДНЫХ УСТАНОВОК

## 9.1. ТРУБОПРОВОДЫ

Трубопроводы применяют для транспортировки воздуха, кис лорода, азота, аргона, аммиака, пара, воды, щелочи и других ве ществ. По трубопроводам передаются газы и жидкости с нормаль ной, высокой и низкой температурой. Трубопроводы, работающи при высокой или низкой температуре, снабжают соответствующей тепловой изоляцией.

В зависимости от назначения и места прокладки различаю внутриблочные, цеховые и межцеховые трубопроводы.

Внутриблочные трубопроводы соединяют узл и части аппаратов (теплообменники, конденсаторы, ректификаци онные колонны и др.) и размещаются в кожухе блока разделе ния воздуха.

Цеховые трубопроводы соединяют отдельные аппарат установки и прокладываются по стенам и колоннам здания, а так же в траншеях и каналах. Трубопроводы укрепляются на кро штейнах или подвесках во избежание провисания и вибрации в время работы установки.

Межцеховые трубопроводы служат для транспорти ровки газов и жидкостей между цехами; они выполняются подзем ными и надземными.

Для отличия трубопроводы окрашивают и снабжают соответ ствующей маркировкой. Согласно отраслевому стандарту ОСТ-26-04-359—68 (ВНИИкриогенмаш) воздушные трубопровод окрашивают в голубой цвет, кислородные — в синий, азотные — в желтый, водяные — в фисташковый, аммиачные — в фиолетовый противопожарные — в красный и т. д.

В зависимости от рабочей температуры транспортируемого ве щества применяют трубы из следующих материалов:

| Температура, °С | Материал труб |
|---|---|
| От —30 до 300 | Сталь ВМСт. 3сп (ГОСТ 380—60*) |
| | Сталь 10 и 20 (ГОСТ 1050—60*) |
| От —40 до —31 | Сталь 10 и 20 (ГОСТ 1050—60*) |
| От —70 до —41 | Сталь 10Г2 (ГОСТ 4543—61*) |
| Ниже —70 | Нержавеющая сталь Х18Н10Т (ГОСТ 5232—50*); латунь Л62 (ГОСТ 494—69); медь М3 (ГОСТ 617—64*) |



Водогазопроводные трубы допускается применять при давлении о 10 *кгс/см*² и температуре от —30 до 200 °С.

При выборе материала для кислородопроводов необходимо учи ывать возможность загорания стали в кислороде. Опытами под верждена опасность загорания стальных трубопроводов для кис орода при наличии в нем частиц окалины, сварочного грата, угля, окса. Загорание происходит на участке после колена труб, где роисходит удар и трение твердых частиц о стенку трубы, при дав ениях 18—30 *кгс/см*² и скорости потока 30—85 *м/сек*.

Наличие в кислороде негорючих частиц (песка, ржавчины, шла а и т. п.) не вызывает загорания стальной трубы*. В зависимости т давления и скорости газообразного кислорода для надземных и одземных трубопроводов кислорода применяют стальные трубы:

| Давление, *кгс/см*² | Скорость, *м/сек* | Применяемые трубы |
|---|---|---|
| о 16 | До 20 | Электросварные, ГОСТ 10704—63, 10705—63, 10706—63 |
| ыше 16 до 64 | До 8 | Бесшовные (при диаметре до 400 *мм*), ГОСТ 8734—58, 8732—58 |
| ыше 16 до 64 | До 8 | Электросварные (при диаметре более 400 *мм*), ГОСТ 10704—63, 10706—63 |
| т 64 до 200 | До 8 | Бесшовные (при подземной прокладке), ГОСТ 8734—58, 8732—58 |

Когда при рабочем давлении скорость потока превышает до пустимые пределы, применяют трубы из меди или латуни. Все надземные кислородопроводы давления 64 *кгс/см*² и выше должны изготовляться только из медных или латунных труб по ГОСТ 617—64* и 494—69.

Для кислородопроводов на давление свыше 16 *кгс/см*² участки, расположенные после арматуры или сужающих устройств (по ходу газа), должны быть выполнены из латунных или медных труб длиной, равной пяти диаметрам условного прохода трубы. Если диаметр трубы превышает 100 *мм*, в основную стальную трубу вставляется медная рубашка на длину, равную пяти диаметрам.

Трубопроводы и арматура для щелочи и аммиака изготовляют только из низкоуглеродистой стали, так как на медь, медные и алюминиевые сплавы эти вещества действуют разрушающе.

Наружные межцеховые трубопроводы прокладывают под землей ниже уровня промерзания и покрывают снаружи противокоррозионной изоляцией.

Надземные межцеховые трубопроводы и трубопроводы, расположенные в земле выше уровня промерзания, транспортирующие несушенные воздух или кислород, покрывают тепловой изоляцией.

Надземные трубопроводы для кислорода, полученного путем испарения жидкого кислорода и не содержащего влаги, а также трубопроводы для осушенных газов прокладывают без наружной тепловой изоляции. Трубопроводы влажных газов прокладывают совместно с паропроводами в той же изоляции.

* Wegener W., Stahl und Eisen, № 8 (1969).

К трубопроводу, транспортирующему кислород, подаваемый компрессорами с эмульсионной смазкой, через каждые 100—150 *м* делают отводы из идущего параллельно паропровода, для пропаривания с целью периодической очистки от отложений эмульсии.

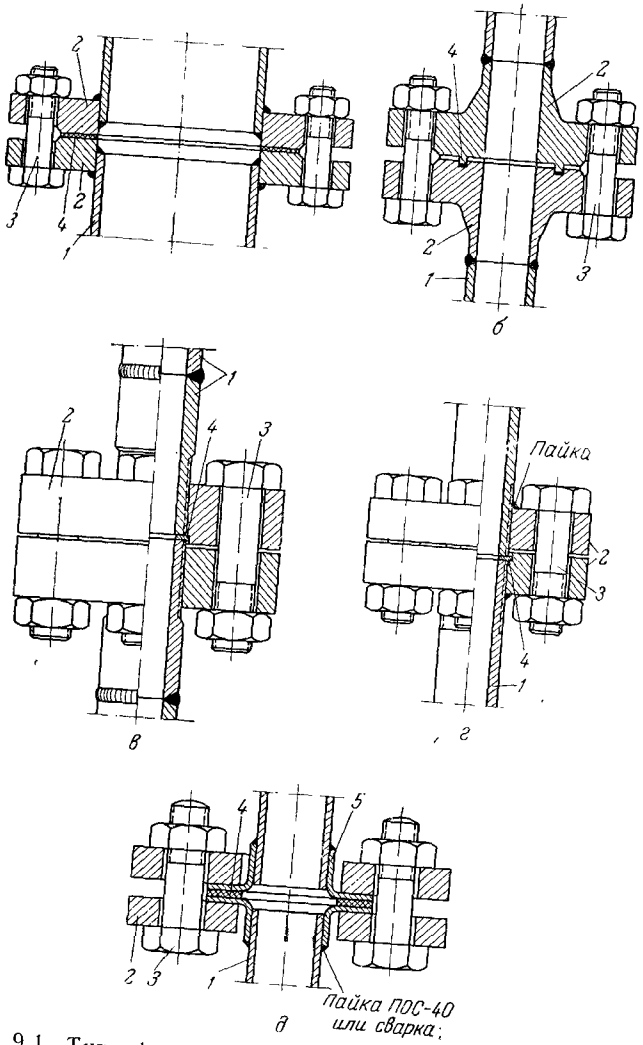



Рис. 9.1. Типы фланцевых соединений трубопроводов:

*а* — плоские фланцы с приваркой угловым швом, для трубопроводов низкого и среднего давления (до 16 *кгс/см²* изб.); *б* — фланцы точеные «с усом», приваренные стыковым швом, для трубопроводов высокого давления (до 220 *кгс/см²* изб.); *в* — фланцы точеные с резьбой, для стальных труб высокого давления (до 220 *кгс/см²* изб.); *г* — фланцы стальные, точеные с резьбой, пропаянной мягким припоем, для труб из красной меди или латуни высокого давления (до 165 *кгс/см²* изб.); *д* — свободно вращающиеся стальные фланцы для труб из латуни, меди и алюминия на давление до 6 *кгс/см²* изб. *1* — труба; *2* — фланцы; *3* — болты; *4* — прокладки; *5* — бортшайба (медная, латунная или алюминиевая).

Длинные трубопроводы снабжают компенсаторами изменения длины труб при повышении и понижении температуры. Компенсаторы ставят и на внутриблочных трубопроводах большого диаметра, если возможны резкие изменения их температуры. На трубопроводах небольшого диаметра вместо компенсаторов предусматривают соответствующие изгибы труб.

Большинство трубопроводов соединяют сваркой; в местах установки арматуры ставят фланцевые соединения с уплотняющими прокладками. На рис. 9.1 показаны некоторые типы фланцевых соединений трубопроводов, а в табл. 9.1 даны материалы прокладок.

Медные трубы соединяют на пайке мягким (оловянисто-свинцовым) или твердым (латунным или серебряным) припоями в зависимости от рабочего давления. В кислородопроводах высокого давления применяется муфтовое соединение или соединение в раструб с пайкой твердым припоем (для медных труб).

При выборе типа уплотнения необходимо учитывать возможность загорания уплотнительного материала в сжатом кислороде. Например, фибра, паронит, клингерит способны гореть в кислороде при температуре от 170 до 300 °С, фторопласт — от 475 до 500 °С. Чем выше давление, тем ниже температура загорания. При ворсистой, истертой поверхности уплотнения его загорание в кислороде облегчается. Воспламенение прокладки может вызвать горение трубы, фланца, корпуса вентиля или его деталей. Известны случаи горения стальных фланцев трубопроводов для кислорода давлением 150—200 *кгс/см²*, вызванные воспламенением прокладок из фибры и фторопласта.

Опасно также пробивание прокладок, сопровождающееся утечкой кислорода в окружающую среду. В связи с этим в кислородопроводах и арматуре предпочтительнее применять такие виды соединений, в которых ограничен доступ кислорода к уплотняющему материалу, например типа «шип-паз» или с экранированием прокладки металлической фольгой. Выбор материала прокладки определяется рабочим давлением и температурой, а также конструкцией уплотнения*.

Трубопроводы для газообразного кислорода должны проектироваться в соответствии с нормами, которые дают «Указания по проектированию и монтажу трубопроводов газообразного кислорода» (У 347-00-4). Руководящим материалом при проектировании трубопроводов жидкого кислорода являются «Указания по проектированию и монтажу трубопроводов жидкого кислорода» (У 870-00-3).

Трубопроводы для газообразного кислорода в соответствии с СНиП II-Г 14—62 делятся на четыре категории:

| Категория | I | II | III | IV |
|---|---|---|---|---|
| Рабочее давление, *кгс/см²* | От 64 до 220 | От 25 до 64 | От 16 до 25 | До 16 |

Трубопроводы для жидкого кислорода, жидкого воздуха и сжиженных редких газов делятся (согласно У 870-00-3) на категории:

| Категория | I | II | III | IV | V |
|---|---|---|---|---|---|
| Рабочее давление, *кгс/см²* | От 64 до 220 | От 16 до 64 | От 6 до 16 | От 2,5 до 6 | До 2,5 |

* Условия безопасного применения конструкционных неметаллических материалов, РТМ 26-04-30—71, ВНИИкриогенмаш.

Таблица 9.1 **Материалы прокладок для трубопроводов разного назначения**

| Транспортируемое вещество | Максимальные значения | | Материал прокладки |
|---|---|---|---|
| | абсолютного давления, *кгс/см²* | температуры, °С | |
| Вода | 6 | 60 | Резина листовая с двумя тканевыми прослойками |
| | 16 | 80 | Паронит (ГОСТ 481—58*) |
| Пар | 64 | 450 | То же |
| Воздух и редкие газы | 6 | 50 | Картон прокладочный (ГОСТ 9347—60) |
| | 64 | 150 | Паронит (ГОСТ 481—58*) |
| | 220 | 200 | Сталь 20 (ГОСТ 1050—60*) при линзовом уплотнении или медь М3 (ГОСТ 859—66) отожженная при уплотнении шип—паз |
| Кислород газообразный | 6 | 200 | Картон асбестовый (ГОСТ 2850—58*) |
| | 25 | 150 | Латунь с асбестовым шнуром (асболатунь)* |
| | 64 | — | Алюминий (ГОСТ 13722—68) |
| | 200 | 150 | Медь М3 (ГОСТ 859—66) отожженная** |
| Кислород жидкий | 1,5 | —180 | Паронит (ГОСТ 481—58*) или фторопласт-4 (ГОСТ 10007—62) |
| Аммиак | 25 | От —50 До +150 | Паронит ГОСТ (481—58*) |
| Масла минеральные | 25 | 200 | То же |
| Щелочь | 50 | 100 | » |

* При давлении от 6 до 64 *кгс/см²* и уплотнении типа шип—паз применяется паронит или фторопласт-4; при давлении до 40 *кгс/см²* и том же уплотнении допускается фибра марки ФПС по ГОСТ 14613—69. См. также РТМ 26-04-30—71, Условия безопасного применения конструкционных неметаллических материалов, ВНИИкриогенмаш.

** При уплотнении типа шип—паз; при линзовом—латунь.

В цехах кислородопроводы можно прокладывать по стенам, на колоннах зданий или в непроходных крытых каналах. Кислородопроводы в каналах разрешается прокладывать совместно с другими трубопроводами только в кислородных цехах и газификационных станциях; в цехах потребления кислорода допускается только открытая совместная прокладка трубопроводов кислорода и других веществ. При невозможности по местным условиям проложить в этих цехах кислородопроводы открыто их следует разместить в отдельных непроходных каналах, предназначенных только для кислородопровода и не сообщающихся с другими каналами. Не допускается совместная прокладка кислородопроводов с силовыми, осветительными и телефонными кабелями. При открытой прокладке кислородопровода между ним и изолированным кабелем должно быть расстояние не менее 500 *мм*, а между ним и голыми



проводами — не менее 1000 *мм*. Кислородопроводы должны быть надежно заземлены.

Межцеховые кислородопроводы можно выполнять подземными и надземными.

Подземные кислородопроводы прокладывают только под проездами и по территории, не подлежащей застройке. Кислородопроводы укладывают в траншею, покрывают гидроизоляцией для предотвращения наружной коррозии, а затем засыпаются землей. В проходных и непроходных тоннелях межцеховые кислородопроводы прокладывать нельзя, так как при нарушении герметичности кислородопровода может повыситься концентрация кислорода в тоннеле, в результате чего возможны пожары и взрывы как в тоннеле, так и в сообщающихся с ним помещениях.

Подземный кислородопровод можно укладывать в одной траншее с другими газопроводами, если все трубы располагаются в одной горизонтальной плоскости на расстоянии 250 *мм* друг от друга и если траншея засыпана землей. Нельзя прокладывать межцеховые кислородопроводы совместно с электрическими (силовыми и осветительными) и телефонными кабелями. Расстояние подземных кислородопроводов газообразного кислорода от стен зданий, трамвайных и железнодорожных рельсов, кабелей и других объектов должно соответствовать нормам У 347-00-4; чем выше рабочее давление кислородопровода, тем больше это расстояние.

Подземные кислородопроводы влажного кислорода следует укладывать ниже глубины промерзания с уклоном не менее 0,0015 *м/м* по ходу и не менее 0,003 *м/м* против хода газа. В низших точках предусматриваются устройства для сбора и вывода конденсата; не рекомендуется устройство колодцев на подземном кислородопроводе.

Сифонные трубки для вывода конденсата и органы управления арматурой выводятся на поверхность земли «под ковер». Подземные кислородопроводы для сухого газообразного кислорода можно прокладывать выше уровня промерзания, но не менее 0,8 *м* от поверхности земли. Межцеховые кислородопроводы обязательно заземлять.

Надземные кислородопроводы прокладывают на несгораемых эстакадах или на кронштейнах по стенам зданий I и II степени огнестойкости; нельзя прокладывать кислородопроводы через цехи, где кислород не потребляется, а также над крышами и по стенам зданий взрыво- и пожароопасных цехов.

Прокладка надземного кислородопровода совместно с другими газопроводами разрешается при расстоянии до соседних трубопроводов не менее 250 *мм* и расположении кислородопровода на самостоятельных креплениях, размещаемых на общих стойках или эстакаде. Запрещается совместная прокладка надземного кислородопровода с электрическими проводами и кабелями.

При избыточном давлении до 64 *кгс/см²* включительно на кислородопроводах устанавливают чугунную или стальную

Для предупреждения возможного искрообразования в такой арматуре при давлениях от 16 до 64 *кгс/см²* уплотнительные поверхности затвора и отдельные элементы пары «шпиндель — грибок» или «шпиндель — клин» необходимо изготовлять из цветных сплавов на основе меди. При давлении выше 64 *кгс/см²* должна применяться арматура из латуни или бронзы.

Арматуру общего назначения перед установкой на кислородопровод следует подвергать предварительной ревизии и обезжириванию, прокладки в ней заменять на указанные в табл. 9.1, а сальниковые уплотнения — на уплотнения из прокаленного при 300 °С шнурового асбеста (ГОСТ 1779—55) с графитом марки ПТ-А (ГОСТ 8295—57). Должна быть исключена возможность попадания масла в сальник. Для арматуры, эксплуатируемой при низкой температуре, в качестве прокладок и сальниковой набивки используют фторопласт-4 по (ГОСТ 10007—62).

Запрещается применять намотку резьбовых соединений кислородопроводов льном, пенькой или протирочными концами, а также промазывать суриком или другими жиросодержащими веществами. Для уплотнения резьбовых соединений применяют замазку из свинцового глета, замешанного на чистой воде или на жидком стекле, а также специальные герметики, взрывобезопасные в контакте с кислородом. Нельзя применять свинцовый глет, замешанный на глицерине*.

Сварка кислородопроводов производится в соответствии с требованиями Госгортехнадзора СССР на сварку трубопроводов.

Межзаводские трассы трубопроводов сооружают согласно «Временным указаниям по проектированию межзаводских трубопроводов газообразного кислорода, азота и аргона ВСН1—69», утвержденным Министерством химической промышленности СССР. В этих указаниях приводятся основные положения проектирования трассы межзаводского трубопровода, переходов через естественные и искусственные преграды, промежуточных компрессорных станций, ремонтно-эксплуатационных и контрольно-измерительных пунктов, ответвлений к предприятиям-потребителям.

Трубопроводы (и шланги) для жидкого и газообразного кислорода обезжиривают при их изготовлении, а также после ремонта. Трубопроводы и шланги для жидкого кислорода при эксплуатации обезжиривают не реже одного раза в год и только в том случае, если содержание масла в транспортируемом жидком кислороде более 0,01 *мг/дм³*. Секции трубопроводов и шланги, обезжиренные при изготовлении, поступившие на монтаж с заглушками и имеющие соответствующие отметки в паспорте, не обезжиривают, ограничиваясь только тщательной их продувкой после гидравлического испытания.

Если в процессе монтажа возможно загрязнение кислородопровода маслом, то после окончания монтажа он подлежит обезжириванию. Наружные поверхности концов труб (0,5 *м*) при монтаже протираются салфетками, смоченными растворителем или моющим раствором, и просушиваются на воздухе.

Внутренние поверхности несмонтированных труб и шлангов обезжиривают путем их заполнения растворителем через штуцера технологических заглушек; наполненные растворителем трубы выдерживают в горизонтальном положении в течение 10—20 *мин*, поворачивая 3—4 раза.

Участки смонтированного трубопровода обезжиривают методом циркуляции растворителя. Небольшие участки можно обезжиривать протиркой или промывкой струей растворителя. Обезжиренные неэксплуатируемые трубопроводы должны быть заглушены.

Растворителями для обезжиривания трубопроводов служит четыреххлористый углерод, трихлорэтилен и тетрахлорэтилен. Разрешается обезжиривание внутренней поверхности труб и шлангов горячим моющим раствором в специальных ваннах. Составы моющих растворов см. «Отраслевой стандарт ОСТ-26-04-312-71, Оборудование кислородное, Методы обезжиривания, Применяемые материалы», ВНИИкриогенмаш.

Промывать трубопроводы для кислорода в условиях монтажа и эксплуатации спиртом, бензином и другими горючими растворителями запрещается во избежание взрыва остатков этих растворителей в кислородной среде.

После промывки трубопровод необходимо тщательно продуть азотом или воздухом до полного испарения и удаления остатков жидкости и паров растворителя. Для более быстрого удаления остатков растворителя азот или воздух следует подогревать до 60—70 °С. Продувка трубопровода должна производиться со скоростью не менее 15—20 *м/сек* и заканчиваться при полном отсутствии в продуваемом газе запаха растворителя, а также капелек влаги и твердых частиц. Это контролируют с помощью наклеенной на щит белой бумаги, которую подносят к струе выходящего продувочного воздуха. Только после обезжиривания и продувки в трубопровод можно подавать кислород.

Количество растворителя, необходимое для обезжиривания внутренней поверхности труб, подсчитывают по формуле

$$Q = (0{,}06 - 0{,}08)\, d \qquad (9.1)$$

где $Q$ — количество растворителя, *дм³* на 1 *пог. м* трубы;
$d$ — условный внутренний диаметр трубы, *см*.

Схема комбинированного способа обезжиривания кислородопроводов, разработанного трестом «Востокметаллургмонтаж», показана на рис. 9.2. В зарядный патрубок *2* вставляют две ограничительные пробки *1*, после чего патрубок присоединяют к трубопроводу *4* и заполняют растворителем *3* через вентили *6*, затем растворитель вытесняется сжатым азотом в трубопровод *4* и со-

* Б. А. Иванов, Кислородная промышленность, № 1 (1969).

бирается в емкости 5. Масло растворяется проходящим в трубопроводе растворителем, а стенки трубопровода протираются ограничительными пробками 1, проталкиваемыми инертным газом. Ограничительные пробки изготовляют из пенополиуретана, стойкого к воздействию нефтепродуктов, растворителей, кислорода и обладающего необходимой пористостью и пластичностью. При этом расход растворителя на обезжиривание трубопроводов уменьшается в 8—10 раз по сравнению с методом заполнения и в 1,7 раза по сравнению с методом конденсации.

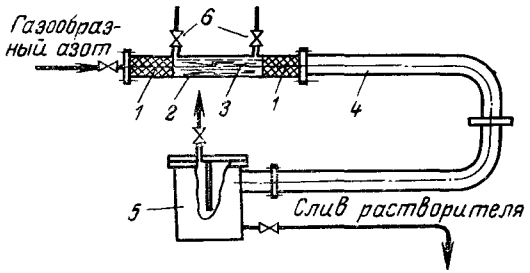



Рис. 9.2. Схема обезжиривания трубопроводов комбинированным способом:

1 — ограничительные пробки; 2 — зарядный патрубок; 3 — растворитель; 4 — обезжириваемый трубопровод; 5 — сборник растворителя; 6 — вентили.

Диаметр трубопровода для кислорода определяют в зависимости от расхода и давления кислорода и допускаемого перепада давлений между начальной и конечной точками трубопровода. При этом местные сопротивления от арматуры, колен и пр. учитываются в эквивалентной длине трубы. Предварительные расчеты можно вести по формуле

$$d = 18{,}8\sqrt{\frac{Q}{c}} \qquad (9.2$$

где $d$ — внутренний диаметр кислородопровода, *мм*;

$Q$ — действительный расход кислорода, $м^3/ч$;

$c$ — скорость газа, *м/сек*.

Величину $Q$ подсчитывают по формуле

$$Q = \frac{Q_н\,(273 + t)}{293p} \qquad (9.3$$

где $Q_н$ — расход газа при температуре 20 °С и абсолютном давлении 1 $кгс/см^2$, $м^3/ч$;

$p$ — абсолютное давление, $кгс/см^2$;

$t$ — температура кислорода, °С.

Для кислородопроводов принимают следующие предельно допустимые скорости кислорода:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Избыточное рабочее давление, $кгс/см^2$ | До 6 | 6—16* | 16—35* | 35—64* | 64—200 |
| Скорость кислорода, *м/сек*, не более | 12 | 8 | 6 | 4 | 3 |

Расчетные скорости не должны превышать предельно допустимых во всем интервале рабочих давлений и во всех точках трубы

* Свыше 6 до 16 включительно, свыше 16 до 35 включительно и т. д.



## 9.2. АРМАТУРА

Для регулирования потоков газов и жидкостей в воздухоразделительных установках применяется различная арматура общепромышленного и специального назначения. Воздухоразделительные установки оснащаются также дистанционным и автоматическим

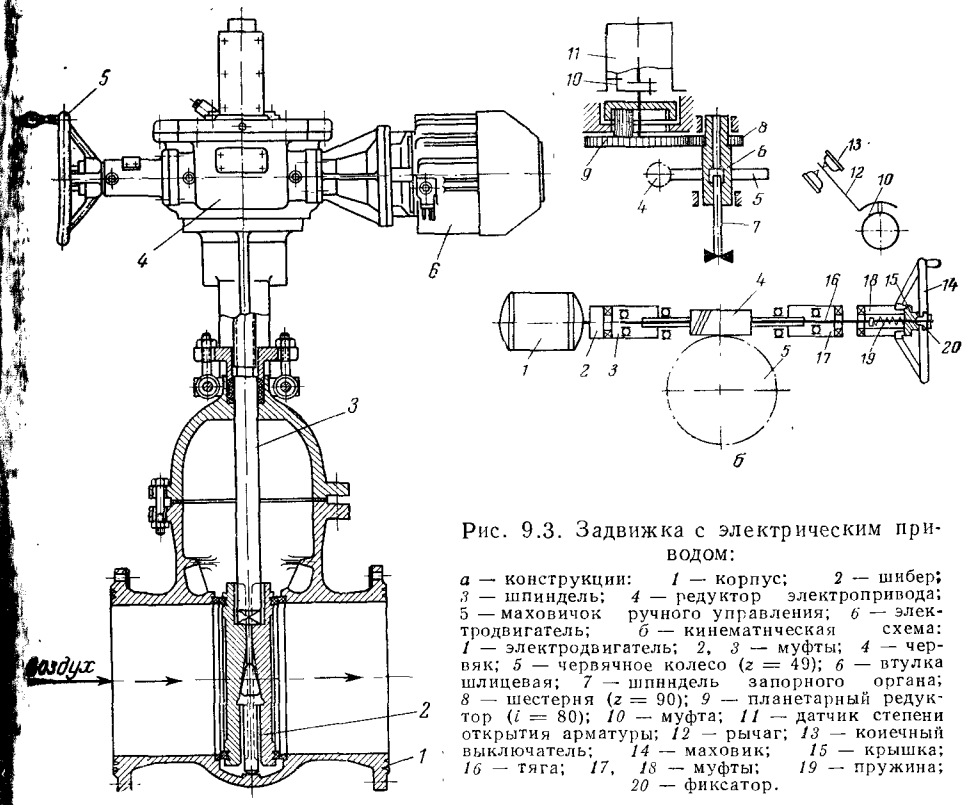



Рис. 9.3. Задвижка с электрическим приводом:

*а* — конструкции: *1* — корпус; *2* — шибер; *3* — шпиндель; *4* — редуктор электропривода; 5 — маховичок ручного управления; *6* — электродвигатель; *б* — кинематическая схема: *1* — электродвигатель; *2*, *3* — муфты; *4* — червяк; *5* — червячное колесо ($z = 49$); *6* — втулка шлицевая; *7* — шпиндель запорного органа; *8* — шестерня ($z = 90$); *9* — планетарный редуктор ($i = 80$); *10* — муфта; *11* — датчик степени открытия арматуры; *12* — рычаг; *13* — конечный выключатель; *14* — маховик; *15* — крышка; *16* — тяга; *17*, *18* — муфты; *19* — пружина; *20* — фиксатор.

управлением. Для этого применяется арматура с электрическими и пневматическими приводами, включение и выключение которых производится дистанционно, с центрального пульта управления вручную или автоматически.

**Задвижки** устанавливают на трубопроводах большого диаметра для сжатого воздуха, пара или воды, например на трубопроводах подачи воздуха под избыточным давлением 5—7 $кгс/см^2$ из турбокомпрессора в блок разделения.

Задвижка с электрическим приводом, применяемая на трубопроводах диаметром 250 *мм* при избыточном давлении 6 $кгс/см^2$ и рабочей температуре от +50 до —50 °С, показана на рис. 9.3. Время полного открытия или закрытия задвижки электродвигате-

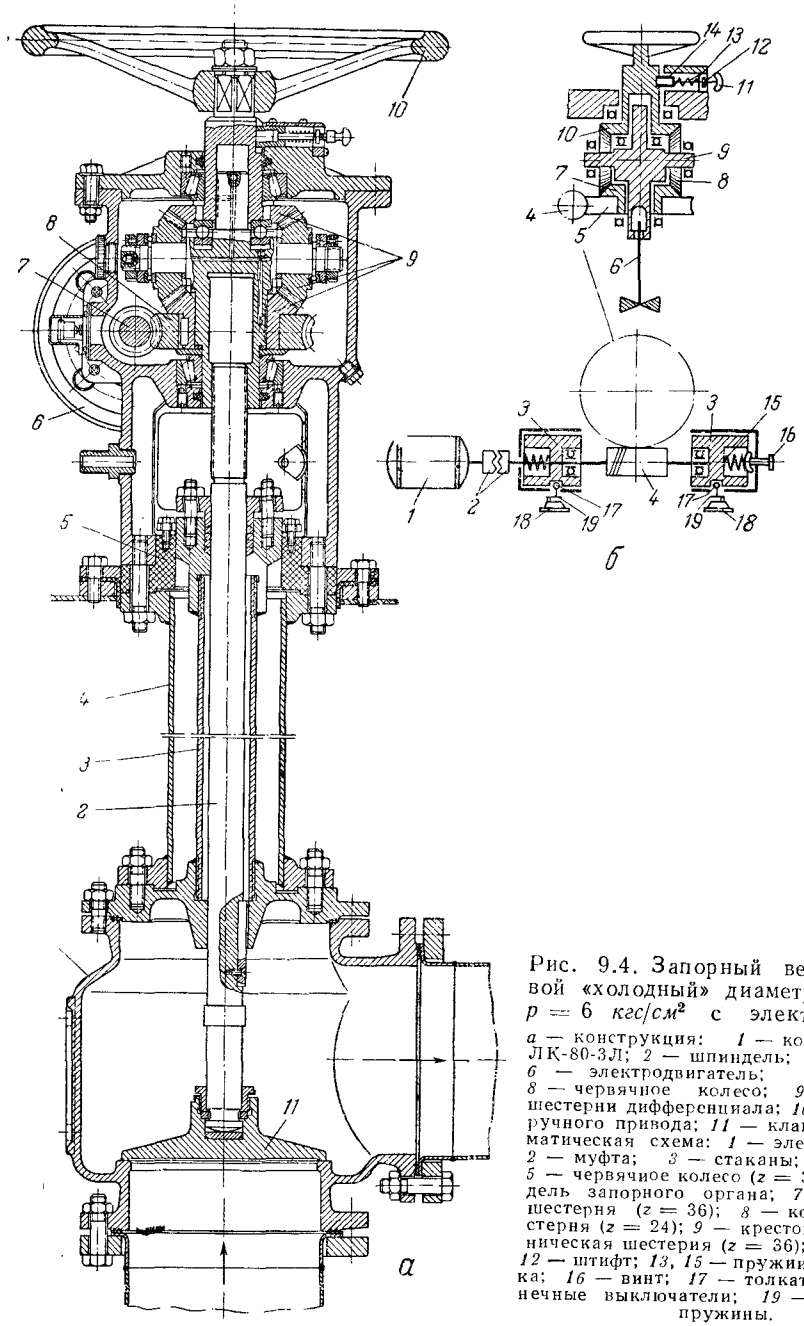



Рис. 9.4. Запорный вентиль угловой «холодный» диаметром 200 *мм*, $p = 6$ *кгс/см*² с электроприводом:

*а* — конструкция: *1* — корпус, латунь ЛК-80-3Л; *2* — шпиндель; *5* — текстолит; *6* — электродвигатель; *7* — червяк; *8* — червячное колесо; *9* — конические шестерни дифференциала; *10* — маховичок ручного привода; *11* — клапан; *б* — кинематическая схема: *1* — электродвигатель; *2* — муфта; *3* — стаканы; *4* — червяк; *5* — червячное колесо ($z = 39$); *6* — шпиндель запорного органа; *7* — коническая шестерня ($z = 36$); *8* — коническая шестерня ($z = 24$); *9* — крестовина; *10* — коническая шестерня ($z = 36$); *11* — кнопка; *12* — штифт; *13*, *15* — пружины; *14* — шпонка; *16* — винт; *17* — толкатель; *18* — конечные выключатели; *19* — пластинчатые пружины.

лем 3,2 *мин*. Корпус задвижки и шибер изготовлены из серого чугуна, уплотнительные кольца в корпусе и шибере — из латуни, шпиндель — из нержавеющей стали; набивка сальника — фторопласт-4.

На трубопроводах меньшего диаметра ставят запорные вентили.

**«Холодные» запорные вентили** работают при температуре газа до —200 °С. Корпуса холодных вентилей высокого давления изготавливают из прокатанной или кованой латуни ЛЖМц-59-1-1 по ГОСТ 1019—47*, а для вентилей низкого давления (не выше 6 *кгс/см*²) — из отливок кремнистой латуни ЛК-80-3Л по ГОСТ 1019—47* с содержанием до 3% кремния.

Для уплотнительных колец сальников используется фторопласт-4 в виде пластин, прутков или холоднопрессованной стружки, пересыпанной графитом КЛТ-1 по ГОСТ 5279—61.

Хорошие результаты дает набивка низкотемпературных сальников из материала АСТ, изготовляемого на основе хризатиласбеста, пропитанного суспензией фторопласта-4Д. Материал АСТ предназначен для работы в условиях низких температур и является хорошим заменителем прографиченного асбеста; он взрывобезопасен в среде жидкого и газообразного кислорода.

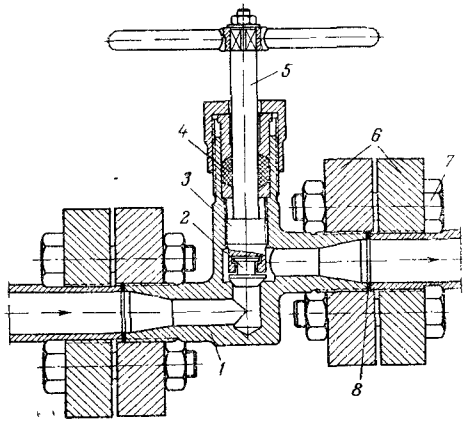


Рис. 9.5. Запорный вентиль высокого давления для воздуха:

*1* — корпус; *2* — клапан; *3* — резьба; *4* — сальник; *5* — шпиндель; *6* — фланцы; *7* — болты; *8* — прокладка.

Запорный вентиль угловой «холодный» диаметром 200 *мм* на избыточное давление 6 *кгс/см*² с электроприводом для дистанционного управления показан на рис. 9.4. Вал электродвигателя *6* (рис. 9.4, *а*) соединен с червяком *7* и вращает червячное колесо *8*, сочлененное шпонкой с нижней конической шестерней дифференциала *9*. Эта шестерня одновременно является гайкой на резьбе верхнего конца шпинделя *2*. При вращении в соответствующем направлении шпиндель ввертывается или вывертывается из втулки шестерни, закрывая или открывая клапан *11* в корпусе вентиля *1*. Для ручного открывания и закрывания клапана служит маховичок *10*, с помощью которого вращают нижнюю шестерню через конические шестерни дифференциала *9*.

**Запорные вентили высокого давления** широко применяются в установках разделения воздуха. В запорном вентиле для воздуха высокого давления — до 220 *кгс/см*² (рис. 9.5) корпус вентиля *1* изготовлен из стальной поковки Ст. 3. Шпиндель *5* снабжен в ниж-

ней части резьбой *3* и соединен со свободно качающимся конусным клапаном *2*, который самоустанавливается в отверстии седла корпуса и закрывает его. Шпиндель уплотнен сальником *4* с асбестовой набивкой. Шпиндель и клапан изготовлены из нержавеющей стали 3Х13 и подвергнуты закалке. Для уплотнения фланцев применяют прокладки *8* из отожженной красной меди. Вентиль в собранном виде испытывают при избыточном давлении 330 *кгс/см*².

В запорном вентиле высокого давления (150—165 *кгс/см*²) для кислорода (рис. 9.6) при вращении маховичка *6* вращается шпиндель *5*, соединенный с клапаном *3* через квадратный хвостовик. При перемещении по резьбе клапана вверх или вниз конус *2* открывает и закрывает отверстие вентиля.

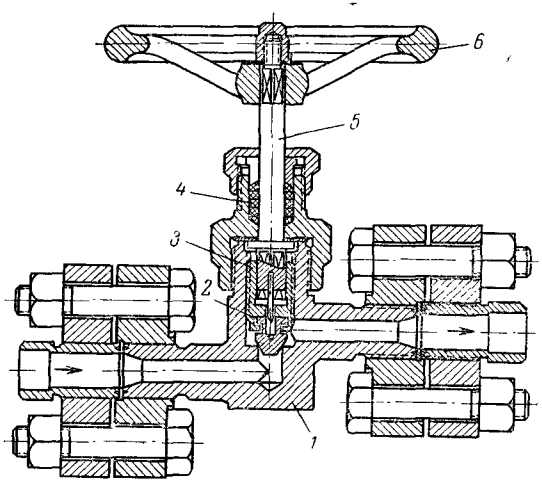



Рис. 9.6. Запорный вентиль высокого давления для кислорода:

*1* — корпус; *2* — конус; *3* — клапан; *4* — набивка сальника; *5* — шпиндель; *6* — маховичок.

Корпус *1* и клапан вентиля изготовлены из латуни ЛС-59-1 или ЛЖМц-59-1-1, а конус клапана — из нержавеющей стали 3Х13 с последующей закалкой. Для уплотнения сальника шпинделя применяется набивка *4* из асбестовых пропитанных прессованных колец. Фланцы изготовляют из стали Ст. 3; они навертываются на вентиль и конец штуцера на резьбе, а затем пропаиваются мягким припоем. Вентиль испытывают под избыточным давлением 250 *кгс/см*² и перед установкой обезжиривают.

На рис. 9.7 показан запорный «холодный» вентиль диаметром прохода 6 *мм* на избыточное давление 220 *кгс/см*².

Для уменьшения потерь холода в окружающую среду вентиль имеет длинный шпиндель из трубки нержавеющей стали, вставленный в трубчатый кожух из той же стали. Кроме того, между теплой и холодной частью вентиля имеется текстолитовая вставка *5*. Вентиль испытывают на гидравлическое давление 330 *кгс/см*² (изб.).



**Дроссельные вентили** служат для понижения давления сжатых газов: воздуха, кислорода, азота и др. Дроссельный вентиль упрощенной конструкции показан на рис. 9.8. Корпус *1* вентиля соединен на резьбе с длинной трубкой *5*, в которой ходит шпиндель *4* с конусом *3* на нижнем конце и резьбой *6* наверху. Уплотняющий сальник *7* выведен за щит аппарата и работает при положительной температуре; в сальнике находится набивка *8* из асбеста или фторопласта-4. Корпус вентиля размещается в изоляции аппарата. С маховичком *10* соединена стрелка-указатель *9* угла поворота, отсчитываемого по шкале *11*. Воздух поступает в нижнее отверстие корпуса и, проходя через узкую щель между конусом *3* и его седлом, дросселируется. В боковое отверстие *12* корпуса *1* впаивается трубка для продувки вентиля.

Применяются дроссельные вентили более совершенной, но и более сложной конструкции. На шпинделе *2* (рис. 9.9) вентиля находится тщательно обработанный уплотнительный конус *1*, заканчивающийся иглой для более точной регулировки давления воздуха за вентилем. Для уменьшения холодопотерь шпиндель снабжен вставкой *3* из текстолита, который обладает

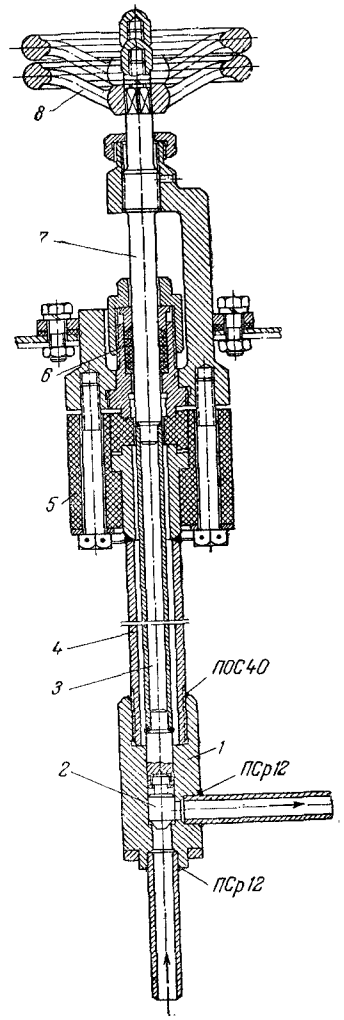



Рис. 9.7. Запорный «холодный» вентиль высокого давления (для воздуха, кислорода или азота), диаметр прохода 6 *мм*; $p_и = 220$ *кгс/см*²:

*1* — корпус (латунь ЛЖМц59-1-1); *2* — клапан (нержавеющая сталь 3Х13); *3* — шпиндель холодный (трубка нержавеющей стали 1Х18Н9Т); *4* — наружная трубка (нержавеющей стали 1Х18Н9Т); *5* — вставка текстолитовая; *6* — сальник; *7* — шпиндель теплый; *8* — маховичок.

хорошими теплоизоляционными свойствами и образует «тепловой барьер» по шпинделю. Этой же цели служат текстолитовая прокладка *4* между холодной и теплой частями вентиля. Маховичок *6* снабжен счетчиком оборотов *7*, на циферблате которого стрелки указывают число оборотов шпинделя вентиля. Резьба *5* шпинделя расположена в теплой части наружного корпуса.

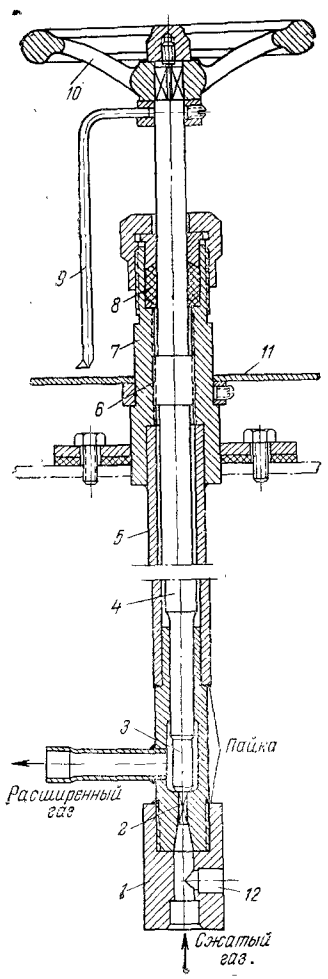



Рис. 9.8. Дроссельный вентиль упрощенной конструкции:

*1* — корпус; *2* — направляющий квадрат; *3* — конус; *4* — шпиндель; *5* — трубка; *6* — резьба; *7* — сальник; *8* — набивка; *9* — стрелка-указатель; *10* — маховичок; *11* — шкала; *12* — отверстие для продувки.

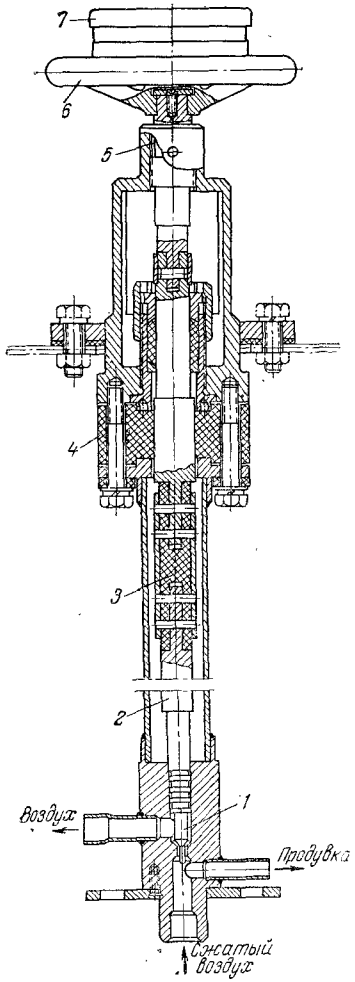



Рис. 9.9. Дроссельный вентиль усовершенствованной конструкции:

*1* — конус; *2* — шпиндель; *3* — тесколит; *5* — резьба; *6* — маховичок; *7* — счетчик оборотов.

В некоторых воздухоразделительных аппаратах применяют дроссельные вентили с сильфонным уплотнением (рис. 9.10). В такой конструкции внутренний шпиндель (клапан) *2* вентиля не получает вращательного движения и перемещается поступательно вверх и вниз внутри корпуса *1* благодаря упругости сильфона *3*; вращается же только наружный шпиндель *4*, расположенный внутри трубки *5*. Шпиндель такого вентиля не имеет сальника и вращается очень легко, что обеспечивает точную регулировку потоков.

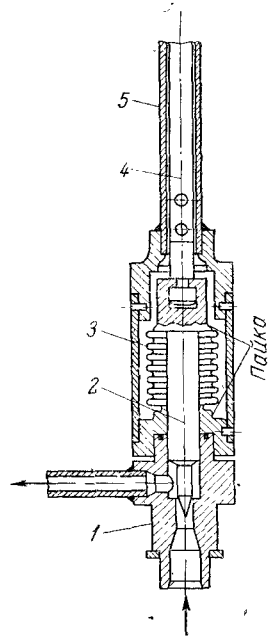



Рис. 9.10. Дроссельный вентиль с сильфонным уплотнением вместо сальника:

*1* — корпус; *2* — клапан; *3* — сильфон; *4* — шпиндель; *5* — трубка.

Точность и плавность регулирования потоков газа и жидкости зависят от конструкции дроссельного вентиля, формы его рабочей части, а также качества изготовления. Дроссельные вентили, конструкция которых не рассчитана на специфические условия работы воздухоразделительных установок, быстро засоряются частицами твердой двуокиси углерода, что вызывает необходимость частой их прочистки («шуровки») и нарушает установленный режим ректификации. Форма конусной части вентиля должна обеспечить точное регулирование проходящих потоков газов и жидкостей.

На рис. 9.11 изображены различные профили рабочей части дроссельного вентиля. Профиль *I* является наименее подходящим, так как при открытии вентиля быстро увеличивается размер щели и значительно изменяется расход газа через дроссель. Такой вентиль часто забивается кристаллами твердой $CO_2$; лучше работают вентили профиля *II*, имеющие конус с углом 30°. В вентиле профиля *III* предусмотрены двойной конус с углом 60° для закрытия вентиля и дополнительная конусная игла для тонкой регулировки. В вентилях профиля *I*, *II* и *III* газ проходит через узкую щель, и поэтому такие вентили в той или иной степени забиваются кристаллами $CO_2$.

Предложенные А. М. Сошинским дроссельные вентили профиля *IV* и *V* не засоряются, так как рабочая щель у них имеет квадратное сечение; площадь сечения щели изменяется по длине конца шпинделя. В этих вентилях конец шпинделя изготовляется из нержавеющей стали и шлифуется, а отверстие под него в корпусе выполняется разверткой, что обеспечивает зазор 0,02—0,03 *мм*. Диаметр конца шпинделя должен в 3—4 раза превышать ширину канавки в нем; угол $\alpha = 12—24°$. Дроссельные вентили профиля *IV* применяются на трубопроводах низкого (6 *кгс/см*$^2$) и высокого

(220 *кгс/см*²) избыточного давления, а профиля *V* — только высокого (220 *кгс/см*²) давления (угол $\alpha_1 = 12°$; $\alpha_2 = 18°$).

Дроссельный вентиль «холодный», с электроприводом (рис. 9.12) на избыточное рабочее давление 6 *кгс/см*², с диаметром прохода 6—25 *мм* применяется в блоках разделения воздуха с дистанционным и автоматическим управлением. Для полного открытия или закрытия вентиля приводом от электродвигателя требуется 10—12 *мин*.

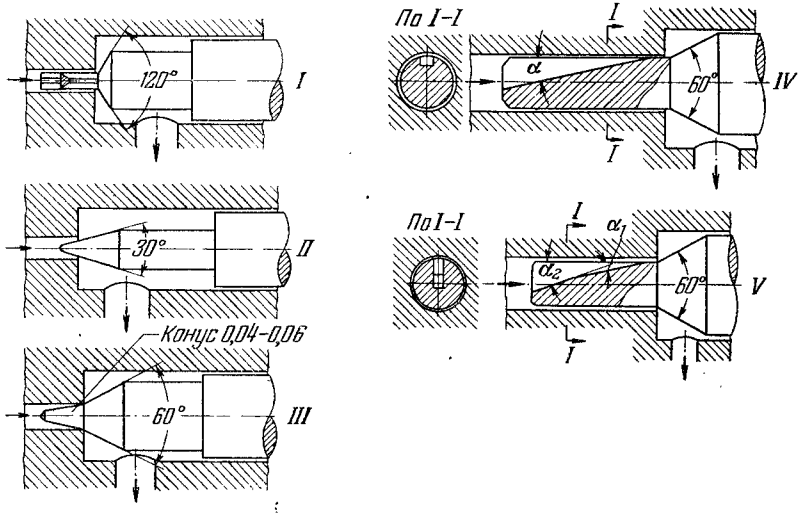



Рис. 9.11. Профили (*I*-*V*) рабочей части дроссельного вентиля.

При дросселировании жидкого кислорода и азота, а также их смесей жидкость находится не в равновесном, а в перегретом состоянии. Дросселирование переохлажденных жидкостей (переохлаждение на 5 *град* и выше, с перепадом давления 3—7 *кгс/см*²), сопровождающееся самоиспарением жидкости, не сказывается заметно на ее расходе через вентиль.

Расчет дроссельных вентилей производится по формуле*

$$Q_{пер} = 1{,}15 \cdot f \sqrt{\Delta p \cdot \rho} \ кг/ч \qquad (9.4)$$

где $f$ — площадь проходного сечения вентиля, *мм*²;
$\Delta p$ — перепад давления в вентиле при дросселировании, *кгс/см*²;
$\rho$ — плотность жидкости, *кг/м*³.

* Л. Н. Мигалинская, А. И. Мороз, Л. С. Аксельрод. О расходе переохлажденных и кипящих газов через дроссельные устройства. Труды ВНИИКИМАШ, вып. 3, Машгиз, 1960.



**Пример 1.** Рассчитать вентиль для кубовой жидкости. Расход 550—880 *кг/ч*, перепад давления 4,5 *кгс/см*², переохлаждение на 6 *град*, плотность жидкости 950 *кг/м*³. По формуле (9.4) получаем:

$$f_1 = \frac{550}{1{,}15\sqrt{4{,}5 \cdot 950}} = 7{,}3 \ мм^2;$$

$$f_2 = \frac{880}{1{,}15\sqrt{4{,}5 \cdot 950}} = 11{,}7 \ мм^2$$

**Пример 2.** Рассчитать вентиль для азотной флегмы. Расход 520—840 *кг/ч*, перепад давления 4,5 *кгс/см*², переохлаждение на 6 *град*, плотность жидкости 808 *кг/м*³. По формуле (9.4) имеем:

$$f_1 = \frac{520}{1{,}15\sqrt{4{,}5 \cdot 808}} = 7{,}5 \ мм^2;$$

$$f_2 = \frac{840}{1{,}15\sqrt{4{,}5 \cdot 808}} = 12{,}0 \ мм^2$$

**Обратные клапаны** допускают прохождение потока газа или жидкости только в одном направлении. Они устанавливаются, например, на воздухопроводе между декарбонизатором и воздушным компрессором с тем, чтобы предотвратить выброс раствора щелочи из декарбонизатора в компрессор. Эти клапаны также ставят на нагнетательной линии между кислородным компрессором и наполнительной рампой для предупреждения перетока сжатого кислорода из баллонов обратно в

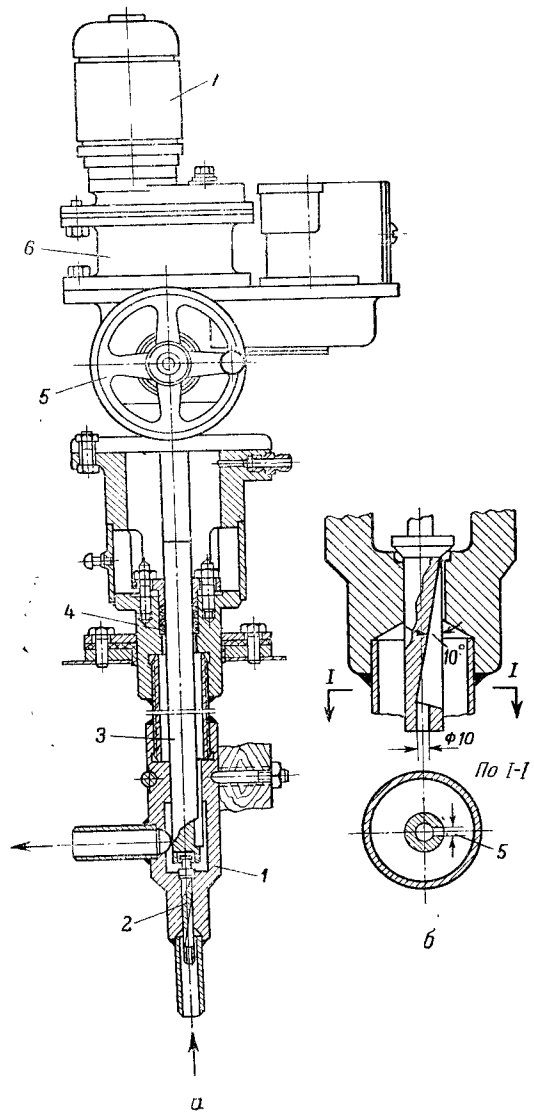



Рис. 9.12. Дроссельный вентиль «холодный» с электроприводом:

*а* — общий вид; *б* — рабочая часть; *1* — корпус; *2* — клапан; *3* — шпиндель; *4* — сальник; *5* — маховичок; *6* — планетарный цилиндрический редуктор; *7* — электродвигатель.

кислородопровод при остановке компрессора, а также в других подобных местах.

**Предохранительные клапаны** применяются для защиты сосудов, аппаратов, трубопроводов и машин от повышения в них давления свыше предела, установленного нормами техники безопасности. Если давление в сосуде превысит установленное предельное, на которое отрегулирован клапан, последний открывается, преодолевая силу нажатия пружины или рычага с грузом, и выпускает часть газа наружу или в продувочный трубопровод.

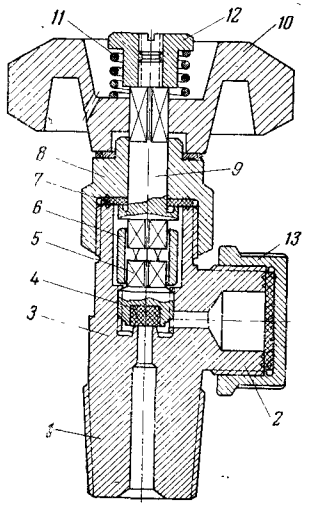



Рис. 9.13. Вентиль для кислородного баллона:

*1* — конусный хвостовик; *2* — боковой штуцер; *3* — корпус; *4* — уплотнитель; *5* — клапан; *6* — передаточная муфта; *7* — кольцевая сальниковая прокладка; *8* — сальниковая гайка; *9* — шпиндель; *10* — маховичок; *11* — пружина; *12* — гайка маховичка; *13* — заглушка.

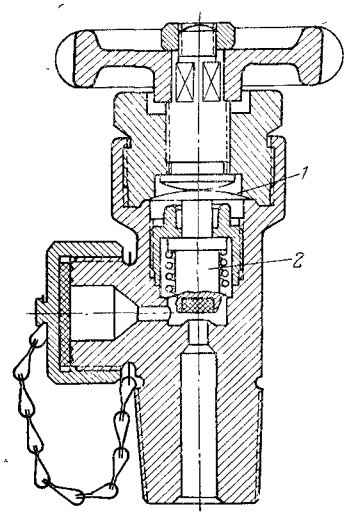



Рис. 9.14. Мембранный вентиль для баллона:

*1* — мембрана; *2* — клапан.

**Вентили для баллонов.** Корпуса вентилей (ГОСТ 699—59) изготовляются штампованными из латуни ЛС-59-1 и снабжаются боковым штуцером с наружной резьбой $^3/_4$ дюйма, правой, трубной. Применяются вентили двух типов: для воздуха, кислорода, азота и водорода — с сальниковым уплотнением шпинделя (рис. 9.13), для редких газов и пропана — мембранные (рис. 9.14). Клапан *5* вентиля (рис. 9.13) имеет уплотнитель *4* из отожженной красной меди. Верхний квадрат клапана соединен со шпинделем *9* передаточной муфтой *6*, имеющей внутри квадратное отверстие. Буртик шпинделя *9* снизу прижимается к кольцевой прокладке *7* (из капрона) усилием пружины *11*, чем обеспечивается уплотнение между шпинделем и сальниковой гайкой. Штуцер водородного вентиля имеет левую трубную резьбу $^1/_2$ дюйма.



Прежде сальниковые прокладки кислородных вентилей изготовляли из фибры ФПК (ГОСТ 14613—69) и пропитывали парафином. Фибровые прокладки довольно быстро выходили из строя и были случаи загорания от трения шпинделя; поэтому фибра была заменена капроном.

Применение меди для уплотнителя клапана также неудачно, так как медь быстро нагартовывается, что делает необходимым применение ключа для плотного закрытия клапана. Таким образом, вопрос о выборе наилучшего вида уплотнений для кислородного вентиля пока не может считаться решенным и исследования в этом направлении продолжаются.

Боковой штуцер вентиля закрыт пластмассовой заглушкой для защиты резьбы от повреждения и загрязнения маслом. При повороте маховичка вращение шпинделя передается клапану через передаточную муфту, открывая или закрывая клапан.

Детали кислородного вентиля, соприкасающиеся со сжатым кислородом, нельзя изготавливать из стали ввиду возможной коррозии и загорания их в среде сжатого кислорода. В качестве материала для этих деталей применяют латунь. Вентили рассчитаны на избыточное давление до 200 *кгс/см*$^2$ и испытываются: пневматически на 200 *кгс/см*$^2$, гидравлически на 300 *кгс/см*$^2$.

Вентили мембранные для баллонов с редкими газами снабжаются латунными заглушками, исключающими возможность утечки дорогостоящего газа при негерметичности клапана.

## 9.3. РЕМОНТ ТРУБОПРОВОДОВ И АРМАТУРЫ

Регулярно, не реже одного раза в год, необходимо проверять герметичность воздухо- и кислородопроводов кислородного цеха и убедиться в отсутствии коррозии, угрожающей прочности трубопровода. Кроме того, следует проверить, нет ли в кислородопроводах отложений масла или продуктов разложения эмульсии.

Ремонт трубопровода можно производить только тогда, когда он отключен от установки, находится под атмосферным давлением и полностью освобожден от газа или жидкости. Ремонт кислородопроводов с применением сварки или пайки производят только после тщательной продувки их азотом или очищенным от масла воздухом, до полного удаления остатков кислорода. Обслуживание, осмотр и ремонт кислородных трубопроводов и арматуры производится специально выделенной бригадой или отдельным рабочим.

Ремонт трубопроводов обычно заключается в их продувке, чистке, устранении негерметичности, покраске. Участки трубопроводов со вмятинами или подвергшиеся сильной коррозии следует вырезать ножовкой или кислородным резаком и на их место вварить новый отрезок трубы соответствующего диаметра. Трещины на трубах заваривают газовой или дуговой сваркой. При ремонте медных и латунных труб можно производить пайку мягкими или твердыми припоем в зависимости от характера неисправности и назначения

трубопровода. Пропуски во фланцевых соединениях устраняют сменой прокладок.

После монтажа и ремонта проводят испытания трубопроводов.

Трубопроводы на избыточное рабочее давление до 0,7 *кгс/см²* подвергают только пневматическому испытанию на прочность и плотность, свыше 0,7 *кгс/см²* — гидравлическому испытанию на прочность и пневматическому на плотность. Для трубопроводов с избыточным давлением до 0,7 *кгс/см²* испытательное давление должно превышать рабочее на 0,3 *кгс/см²*, а для трубопроводов с избыточным давлением свыше 0,7 *кгс/см²* испытательное давление должно быть равно 1,25 от рабочего давления, но не менее 1 *кгс/см²*.

Трубопроводы, непосредственно связанные с аппаратами, испытываются на то же давление, что и аппараты, к которым они относятся. Гидравлическому испытанию на прочность подвергают только те трубопроводы, которые допустимо заполнять водой. После гидравлического испытания трубопроводы испытывают пневматически на плотность под рабочим давлением. Для пневматического испытания кислородопроводов должен применяться воздух или азот, не содержащий примеси масла.

При испытании на плотность отсутствие пропусков в соединениях проверяется обмазкой их мыльным раствором. Плотность трубопровода в целом проверяется по величине утечки в течение 24 *ч*. Падение давления за этот период в трубопроводах с рабочим давлением до 1 *кгс/см²* должно быть не более 1%, а в трубопроводах с рабочим давлением свыше 1 *кгс/см²* — не более 0,5% от начального давления.

Результаты осмотра и ремонта трубопроводов регистрируют в специальном цеховом журнале, и в отдельных случаях составляются акты осмотра и ремонта.

В случае негерметичности трубопроводов и арматуры возникают потери сжатого воздуха или кислорода, поэтому пропуски следует устранять при первой возможности. Особенно нежелательны пропуски холодного газа в вентилях и соединениях, так как это приводит к обмерзанию арматуры и дополнительным холодопотерям.

Ремонт арматуры заключается в устранении пропусков в клапанах запорных и дроссельных вентилей, сальниках штоков вентилей, фланцевых и муфтовых соединений и т. д. Клапаны ремонтируют путем зачистки рабочей поверхности седла и клапана с последующей притиркой клапана к седлу пастой ГОИ (смесь окиси хрома, силикагеля, стеарина, расщепленных жиров и керосина) выпускаемой для грубой, средней и тонкой полировки; в пасты для средней и тонкой полировки добавляют олеиновую кислоту и двууглекислую соду. Скорость движения одной притираемой детали относительно другой не должна превышать 12 *м/мин*.

Пропуски в сальниках устраняют подтягиванием втулок или заменой сальниковой набивки.



Арматуру после пайки следует тщательно промыть, удалить с нее остатки кислоты и следы коррозии, а после гидравлических испытаний просушить продувкой теплым воздухом или азотом.

Арматуру высокого давления (220 *кгс/см²*) подвергают в собранном виде гидравлическому испытанию на прочность при избыточном давлении 330 *кгс/см²* в течение 5 *мин*, а затем пневматическому испытанию на плотность при избыточном давлении 220 *кгс/см²* в течение времени, необходимого для осмотра.

Арматуру низкого давления (6 *кгс/см²*) испытывают на прочность под избыточным гидравлическим давлением 9 *кгс/см²* в течение 5 *мин* и на плотность — под избыточным пневматическим давлением 6 *кгс/см²* в течение времени, необходимого для осмотра.

Герметичность вентиля проверяют пятикратным открыванием и закрыванием его, причем давление дается под клапан. Для проверки плотности сальника его опускают в воду или обмыливают; проверку производят при крайних положениях клапана и поворачивании шпинделя.

Для вентилей высокого и низкого давления с проходом клапана менее 100 *мм* пропуск в клапане при испытании на плотность не допускается. Для вентилей низкого давления с проходом более 100 *мм* допускается пропуск газа через клапан не более 0,3 *дм³/ч* на 1 *см* диаметра прохода клапана.

Предохранительные клапаны после притирки испытывают на плотность при рабочем давлении. Пропуск в клапане должен начинаться при давлении, на 10—12% превышающем рабочее давление. При рабочем давлении предохранительный клапан может пропускать не более 5—6 пузырьков газа в 1 *мин*.

Детали кислородной арматуры после ремонта и испытаний должны быть тщательно обезжирены.

ГЛАВА 10

# ХРАНЕНИЕ И СЖАТИЕ КИСЛОРОДА

При хранении и сжатии кислорода применяется специальное оборудование, сконструированное с учетом особых физико-химических свойств кислорода. В настоящей главе дается описание устройства и приводятся основные правила эксплуатации указанного оборудования.

## 10.1. ГАЗГОЛЬДЕРЫ

В воздухоразделительных цехах применяются газгольдеры двух типов: низкого (постоянного) и высокого (переменного) давления; последние называют также *реципиентами* или *хранилищами*.

**Газгольдеры низкого давления.** В качестве газгольдеров низкого давления применяют мокрые газгольдеры с плавающим колоколом или сухие, состоящие из нескольких частей, снабженных уплотнительными устройствами и связанных между собою телескопически. Для небольших объемов газов используются также резинотканевые газгольдеры. Для газгольдеров низкого давления пределы давления газа составляют от 150 до 400 *мм вод. ст.*, емкость — от 100 до 30 000 $м^3$.

Назначение газгольдеров низкого давления:

хранение и выдача запаса газа при равномерном его производстве и неравномерном потреблении;

сглаживание пульсаций выдачи газов при работе регенераторов;

усреднение концентрации получаемого продукта;

отделение механических примесей (минеральной пыли и пр.);

улавливание продуктов испарения сжиженных газов при наполнении транспортируемых сосудов и подаче по трубопроводам.

По отношению к потоку производимого установкой газа газгольдеры могут подключаться «в тупике» и «на проток». Нормальным считается заполнение газгольдера на 65% его номинальной емкости. Максимально допустимое заполнение газгольдера составляет 90% его номинальной емкости; при этом он должен автоматически отключаться.



Для увеличения создаваемого в газгольдере давления газа колокол его нагружают бетонными блоками. Подогрев воды в резервуаре в случае необходимости производится паром давлением 4 $кгс/см^2$.

Во время эксплуатации газгольдера необходимо следить по указателю за положением колокола и давлением в газгольдере, не допускать переполнения его кислородом. Образование в газгольдере вакуума также недопустимо, так как это может привести к подсосу воздуха из окружающей среды и загрязнению кислорода азотом, а в некоторых случаях и к смятию колокола под действием атмосферного давления.

Для предохранения металлического газгольдера от коррозии стенки его, соприкасающиеся с водой и кислородом, окрашивают свинцовым суриком на олифе. Наружную поверхность окрашивают в три слоя перхлорвиниловой эмалью ПХВ-23 (ГОСТ 6993—54) по двухслойному грунту ВХГМ (ВТУ МХП 4204—55). Последний слой эмали покрывают лаком ХСЛ (ГОСТ 7313—55) с добавкой 20—25% растворителя Р-4 (ГОСТ 7827—55) и 15% алюминиевой пудры.

Герметичность колокола и трубопроводов газгольдера проверяют не реже одного раза в 3 месяца.

В небольших и средних установках производительностью до 300 $м^3/ч$ применяют мягкие сухие газгольдеры (ГОСТ 2687—55) емкостью 50 и 125 $м^3$, изготовленные из двойной прорезиненной ткани (перкаля). Газопроницаемость стенки такого газгольдера (по водороду) не превышает 8 $дм^3/м^2$ в сутки*.

Мягкие газгольдеры должны располагаться в отдельном помещении кислородной станции в подвешенном состоянии. Их регулярно осматривают, чтобы убедиться в отсутствии повреждений ткани. Потертые и пересохшие места, а также разрывы оболочки ремонтируют, наклеивая изнутри заплаты. В целях защиты от быстрого старения и преждевременного разрушения оболочки следует предохранять от действия прямых солнечных лучей. Температура помещения, в котором находятся мягкие газгольдеры, должна быть в пределах 5—25 °С.

Максимально допустимое давление в мягком газгольдере 50 *мм вод. ст.* На впускной трубе устанавливается гидравлический предохранительный затвор. При повышении давления в газгольдере сверх допустимой величины вода из затвора вытесняется и избыток газа выходит в атмосферу. Уровень воды в затворе должен находиться на заданной высоте.

---

* Для хранения кислорода 1-го сорта с концентрацией 99,7% $O_2$ резинотканевые газгольдеры непригодны, так как концентрация кислорода при длительном хранении может понизиться вследствие диффузии азота из атмосферного воздуха.

В установках с жидкостными насосами, подающих получаемый продукт в баллоны или трубопровод под давлением, газгольдеры не нужны.

**Газгольдеры высокого давления (реципиенты)** служат для создания запаса газа под высоким давлением. Расходуемый из них газ проходит центральный регулятор давления (редуктор), который понижает давление газа до требуемой величины (обычно до избыточного давления 15 *кгс/см*²) и поддерживает это давление постоянным в течение всего времени подачи газа в трубопровод потребителя (например, на резку металла, в конвертор или мартеновскую печь и т. п.). Реципиенты собирают (составляют, комплектируют) из стальных баллонов емкостью по 400 *дм*³ (ГОСТ 9731—61), рассчитанных на рабочее давление 200 *кгс/см*².

Гидравлическую емкость реципиента определяют по формуле:

$$W = \frac{V_{зап} + V_{раб}}{p_{max} - p_{min}} k_t \qquad (10.1)$$

где $W$ — гидравлическая емкость, *м*³;
$V_{зап}$ — нужный запас хранимого газа (при 20 °С, 760 *мм рт. ст.*);
$V_{раб}$ — объем газа, необходимый для сглаживания неравномерности потребления, *м*³ (при 20 °С, 760 *мм рт. ст.*);
$p_{max}$, $p_{min}$ — максимальное и минимальное давление газа в реципиенте, *кгс/см*²;
$k_t$ — температурный поправочный коэффициент, который для отношения $p_{max}/p_{min}$ = 4—6 находится в пределах 1,3—1,9; этот коэффициент учитывает изменение температуры газа в процессе наполнения и опорожнения реципиента.

## 10.2. СОСУДЫ ДЛЯ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

Сжиженные газы (кислород, азот, аргон и др.) хранят и перевозят в стационарных и транспортных сосудах (цистернах), снабженных высокоэффективной тепловой изоляцией. Стационарные цистерны устанавливают в непосредственной близости от воздухоразделительных аппаратов, с которыми они соединяются теплоизолированными трубопроводами для слива сжиженного газа. Такие же цистерны используют на складах хранения сжиженных газов, куда последние доставляют в транспортных сосудах по железной дороге или автомашинами.

Для тепловой изоляции сосудов, предназначенных для хранения сжиженных газов, используются высокий вакуум, вакуумно-порошковая изоляция, вакуумно-экранированная слоистая изоляция и насыпная изоляция.

**Высокий вакуум.** Этот способ изоляции заключается в том, что из межстенного пространства сосуда откачивается воздух до остаточного давления $1 \cdot 10^{-5}$—$1 \cdot 10^{-6}$ *мм рт. ст.* Такой способ высокоэффективен, но технологически достаточно сложен и поэтому применяется для небольших сосудов (например, сосудов Дьюара) емкостью до 100 *дм*³.



**Вакуумно-порошковая изоляция.** При этом способе теплоизоляции межстенное пространство сосуда заполняется тонким порошком с последующей откачкой из него воздуха до остаточного давления $1 \cdot 10^{-1}$—$1 \cdot 10^{-2}$ *мм рт. ст.* В таких условиях коэффициент теплопроводности, например для аэрогеля, при —85 °С уменьшается с 0,0125 до 0,0012—0,0013 *ккал/(м·ч·град)*, т. е. в 10 раз.

При применении вакуумно-порошковой изоляции суточное испарение жидкого кислорода не превышает 0,4—0,5% емкости резервуара.

Данный способ технологически проще, чем изоляция высоким вакуумом и достаточно надежен в эксплуатации; испарение сжиженного газа незначительное, поэтому вакуумно-порошковая изоляция находит сейчас преимущественное применение.

Эффективность вакуумно-порошковой изоляции может быть значительно повышена добавлением в нее светлых металлических порошков (медных, бронзовых, алюминиевых). При добавлении в аэрогель (или в аэросиль или в белую сажу) 50% бронзовой пудры БПИ (ТУ 124—66) коэффициент теплопроводности при 90 °К уменьшается с 0,0013 *ккал/(м·ч·град)* при остаточном давлении $1 \cdot 10^{-2}$ *мм рт. ст.* до 0,00035 *ккал/(м·ч·град)* при $5 \cdot 10^{-3}$ *мм рт. ст.*, т. е. в 3,7 раза. Это объясняется отражением металлическими частицами пудры тепловых инфракрасных лучей в изолирующем пространстве. Вследствие этого приток тепла к жидкости от излучения существенно понижается. Добавление металлических порошков к перлиту малоэффективно.

**Вакуумно-экранированная слоистая изоляция** представляет собой многослойную обмотку сосуда теплоотражающими экранами с откачкой воздуха из межстенного пространства сосуда до остаточного давления $1 \cdot 10^{-5}$—$1 \cdot 10^{-6}$ *мм рт. ст.* Для экранов применяют алюминиевую фольгу толщиной 5—20 *мкм* или металлизированную лавсановую пленку. Проставки между экранами выполнены из стекловолокна. Коэффициент теплопроводности такой изоляции 0,00004 ($0{,}4 \cdot 10^4$) *ккал/(м·ч·град)*, т. е. в 8 раз ниже, чем для вакуумно-порошковой изоляции с металлическими порошками. Ввиду технологической сложности этот вид изоляции применяют только в небольших сосудах для обеспечения минимального испарения газа, а также в сосудах для жидких неона, водорода и гелия.

**Насыпная изоляция** выполняется из порошкообразных или волокнистых изоляционных материалов, которые при атмосферном давлении засыпают в межстенное пространство сосуда. Этот способ наиболее прост, широко использовался в прежние годы, но дает наиболее высокие потери сжиженного газа от испарения. Поэтому в настоящее время вместо насыпной изоляции применяют вакуумно-порошковую.

**Теплоизоляционные материалы.** Для тепловой изоляции сосудов с жидкими кислородом, азотом и аргоном применяют высокопористые сыпучие материалы — аэрогель, перлит и др. Использовав-

шиеся в прежние годы углекислая магнезия и мипора сейчас не применяются ввиду их недостаточной эффективности.

Аэрогель (МРТУ 6-02-448—67) — высокопористый изоляционный материал в виде белого с синеватым оттенком порошка. Получается из гидрогеля кремневой кислоты. Аэрогель химически инертен, негорюч.

Для вакуумно-порошковой изоляции используется аэрогель марки В, для насыпной — марки Н. Аэрогель должен удовлетворять следующим требованиям:

| | Марка В | Марка Н |
|---|---|---|
| Частицы размером, % | | |
| до 0,315 *мм*, не менее | 80 | — |
| от 0,315 до 0,6 *мм*, не более | 19 | — |
| от 0,6 до 1,0 *мм*, не более | 1 | 100 |
| Объемная масса, *кг/м³* | | |
| при утряске | 40—60 | 20—40 |
| при уплотнении под вакуумом, не более | 140 | — |
| Коэффициент теплопроводности, *ккал/(м·ч·град)* | | |
| при —85 °С и атмосферном давлении, не более | — | 0,016 |
| при —85 °С и 0,01 *мм рт. ст.*, не более | 0,0014 | — |
| Содержание влаги, %, не более | 0,6 | 3,0 |
| Наличие органических соединений (в пересчете на углерод), %, не более | 0,5 | 0,6 |

Перлит — стекловидный минерал вулканического происхождения. Содержит 70—75% кремнезема, 12—15% окиси алюминия, 4—8% щелочных окислов и 4% кристаллизационной воды. При нагревании измельченный перлит вспучивается, в результате чего объемная масса его сильно уменьшается. Вспученный перлит просеивают до получения фракции зерен размером 0,03—1 *мм*. Объемная масса вспученного перлита, в зависимости от размеров частиц, может изменяться в пределах от 40 до 400 *кг/м³*. При диаметре частиц 1—2 *мм* объемная масса его равна 110 *кг/м³*, при 0,2—0,4 *мм* — 170 *кг/м³*. Перлит негорюч и химически инертен, легко течет и мало гигроскопичен. Для уменьшения влагопоглощаемости его пропитывают солями; влагоемкость гидрофобированного перлита — 30—60% его первоначальной массы.

Перлит, как и аэрогель, применяется для вакуумно-порошковой изоляции сосудов с жидким кислородом.

Перлитом следует заменять магнезию в сосудах с насыпной изоляцией (старой конструкции) для хранения сжиженных газов, поскольку он менее гигроскопичен, в 3—4 раза легче, в 1,5 раза менее теплопроводен и дешевле, чем магнезия. Целесообразно применять перлит также для изоляции блоков разделения воздуха.

Под влиянием вибрации перлит дает усадку, поэтому применяют следующий порядок засыпки им изоляционного пространства при вакуумно-порошковой изоляции. При разряжении 400 *мм рт. ст.* сосуд с перлитом подвергают вибрации с частотой 50 *гц* и двойной амплитудой 0,4 *мм* в течение 1—2 *ч*. Затем под вакуумом засыпают новую порцию перлита, после чего операция повторяется. Такой способ засыпки исключает последующую усадку перлита.



Смесь из 50% перлита и 50% аэрогеля не дает усадки при вибрации после ее засыпки под разряжением 100—150 *мм рт. ст.* Коэффициент теплопроводности такой смеси на 20% ниже, чем у перлита, и в 1,7—1,8 раза меньше, чем у аэрогеля.

Для вакуумно-порошковой изоляции сосудов со сжиженными газами применяются также перлитовая пудра (МРТУ 6-ЕУ-232—62) или смесь, состоящая из 30% аэрогеля и 70% перлитовой пудры.

Белая сажа БС-280 и аэросил А-380 являются разновидностями тонкодисперсной двуокиси кремния ($SiO_2$); отличаются от аэрогеля способом получения. Применяются для вакуумно-порошковой изоляции.

Характеристика этих материалов приводится ниже:

| | Белая сажа БС-280 | Аэросил А-380 |
|---|---|---|
| Размер частиц, *мм* | 0,015 | — |
| Насыпная плотность, *кг/м³* | 150 | 60 |
| Удельная поверхность, *м²/г* | 280 | 380 |
| Коэффициент теплопроводности | | |
| *ккал/(м·ч·град)* | 0,0006 | 0,0017 |
| *мвт/(м·град)* | 0,7 | 1,9 |

Аэрогель окиси алюминия также применяется в качестве теплоизоляционного материала; размер частиц 0,025—0,1 *мм*, насыпная плотность 50 *кг/м³*, коэффициент теплопроводности 0,0017 *ккал/(м·ч·град)* [1,9 *мвт/(м·град)*].

Кремнегель — порошок с частицами размером 6—8 *мкм*. Содержит 95% кремнезема, остальное — примеси. Объемная масса (насыпная плотность) при уплотнении 115 *кг/м³*, при максимальной утряске 130 *кг/м³*. Применяется для вакуумно-порошковой изоляции сосудов с жидким кислородом.

Материал ПСБ (ВТУ № 50—64) получается путем вспенивания и спекания гранул полистирола; насыпная плотность 20—30 *кг/м³*, коэффициент теплопроводности 0,030—0,035 *ккал/(м·ч·град)* [0,035—0,040 *вт/(м·град)*] при 293 °К.

Пенополиуретан ППУ-305 (ТУ В-121—68). Насыпная плотность 35—55 *кг/м³*, коэффициент теплопроводности не более 0,030 *ккал/(м·ч·град)* [0,035 *вт/м·град*] при 293 °К. Водопоглощение за 24 *ч* не превышает 0,1 *кг/м²*. Пенополиуретан марки ППУ-3с (МРТУ 6-05-925—63) имеет несколько большие насыпную плотность (50—70 *кг/м³*) и коэффициент теплопроводности 0,035 *ккал/(м·ч·град)* [0,040 *вт/(м·град)*] при 293 °К.

Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов сильно зависит от их объемной массы, а также давления и температуры. На рис. 10.1 приведены кривые, характеризующие коэффициенты теплопроводности некоторых изоляционных материалов[12].

**Сосуды Дьюара.** Применяются для хранения и транспортирования небольших количеств сжиженных газов (кислорода, азота,

жидкого воздуха и др.). В зависимости от назначения применяют сосуды Дьюара шаровой или цилиндрической формы.

По ГОСТ 16024—70 изготовляются сосуды Дьюара типа АСД шаровой и цилиндрической формы емкостью 5, 16, 25 и 100 *дм*³ и типа ЦСД цилиндрической формы емкостью 5, 10, 16 и 50 *дм*³. Сосуды АСД используются для транспортирования и хранения сжиженных газов, а цилиндрические сосуды ЦСД — для охлаждения и хранения различных предметов в среде сжиженных газов.

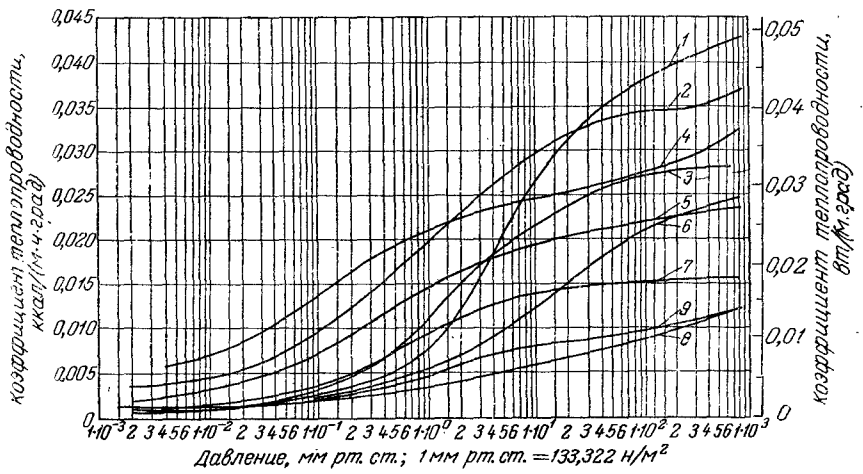



Рис. 10.1. Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов при средней температуре —85 °С в зависимости от давления:

*1* — магнезия; *2* — минеральная вата; *3* — перлит объемной массы 170 *кг/м*³, диаметр частиц 0,2—0,4 *мм*; *4* — крупноволокнистая стеклянная вата; *5* — тонковолокнистая стеклянная вата; *6* — кремнегель объемной массы 150 *кг/м*³; *7* — мипора, уплотненная до 50—60 *кг/м*³; *8* — аэрогель объемной массы 94 *кг/м*³; *9* — аэрогель объемной массы 140 *кг/м*³ (по данным физико-технической лаборатории ВНИИКИМАШ).

Воздух из межстенного пространства сосуда откачивается до остаточного давления $1 \cdot 10^{-1}$—$2 \cdot 10^{-1}$ *мм рт. ст.* после засыпки порошковой экранированной изоляцией (аэрогелем с бронзовой пудрой) Внутри вакуумного пространства помещена камера, заполняемая адсорбентом (силикагелем, цеолитом) для поглощения остаточного количества газов и понижения остаточного давления в межстенном пространстве до $(1—5) \cdot 10^{-3}$ *мм рт. ст.*

На рис. 10.2, *а* показан сосуд Дьюара АСД-15 шаровой формы емкостью 16 *дм*³ с вакуумно-порошковой экранированной изоляцией. Сосуд изготовляется аргоно-дуговой сваркой из сплава АМц толщиной 2—4 *мм*. Горловина из трубки нержавеющей стали Х18Н10Т с толщиной стенки 0,3 *мм*. Перед сваркой со сплавом АМц трубка предварительно алитируется горячим способом в расплаве алюминия. Трубку можно также припаивать припоем ПОС-61 к сосуду из АМц через омедненные втулки из сплава АМц. Пространство между стенками внутреннего и наружного шаров (30 *мм*) заполнено смесью аэрогеля с бронзовой пудрой БПИ в количестве 2—2,5 *кг*. Засыпка производится под вакуумом на вибростенде.

В адсорбционную камеру помещено 500—700 *г* цеолита СаА. Вакуумирование межстенного пространства производят через нижнюю алюминиевую трубку 12×2 *мм*, соединенную со свернутой в кольцо перфорированной трубой, расположенной в изоляции

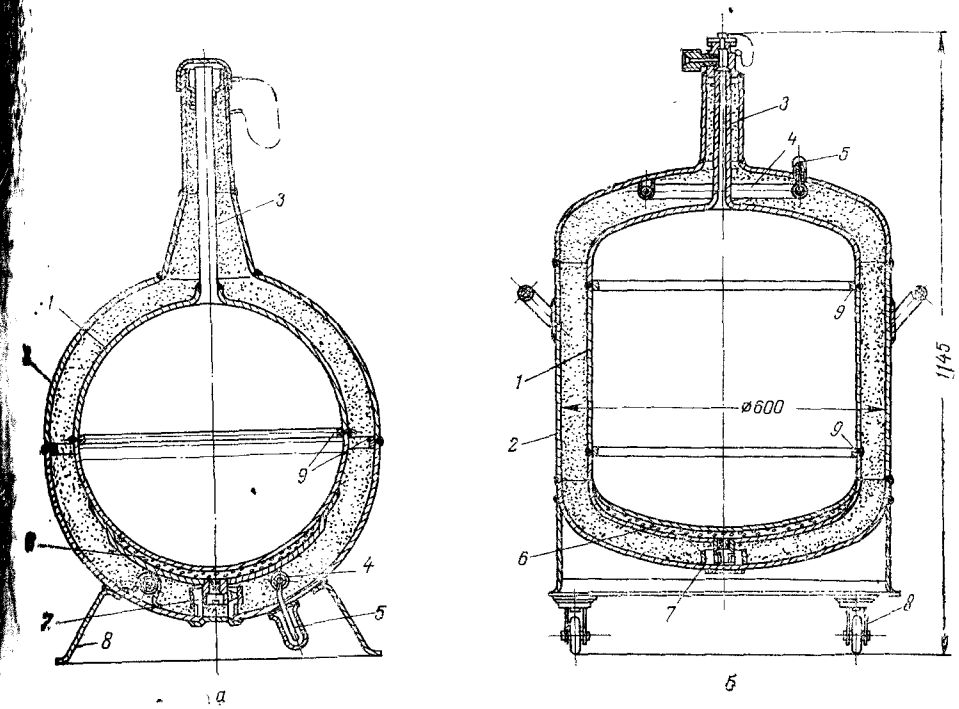



Рис. 10.2. Сосуды Дьюара:

*а* — шаровой АСД-15 емкостью на 16 *дм*³; *б* — цилиндрический, емкостью 100 *дм*³: *1* — внутренний сосуд; *2* — наружный сосуд; *3* — горловина; *4* — перфорированная труба; *5* — патрубок для откачки; *6* — камера с адсорбентом; *8* — опора; *9* — подкладные кольца для сварки.

и покрытой сверху фильтрующим материалом. После сварки вакуумная плотность швов проверяется гелиевым течеискателем при остаточном давлении внутри сосуда $1 \cdot 10^{-4}$ *мм рт. ст.*

Сосуд Дьюара типа АСД-100 емкостью 100 *дм*³ цилиндрической формы, изготовленный описанным способом, изображен на рис. 10.2, *б*.

Испарение сжиженного газа в сосудах Дьюара типа АСД по ГОСТ 16024—70 не должно превышать:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Емкость сосуда, *дм*³ | 5 | 16 | 25 | 100 |
| Потери на испарение, *г/ч* | | | | |
| по азоту | 22 | 34 | 40 | 90 |
| по кислороду | 20 | 32 | 38 | 85 |
| по аргону | 28 | 42 | 50 | 115 |
| по воздуху | 22 | 34 | 40 | 90 |

Для цилиндрических сосудов типа ЦСД потери значительно больше и, например, для сосуда ЦСД-15 емкостью 16 *дм*³ составляют 80 *г/ч* (по азоту).

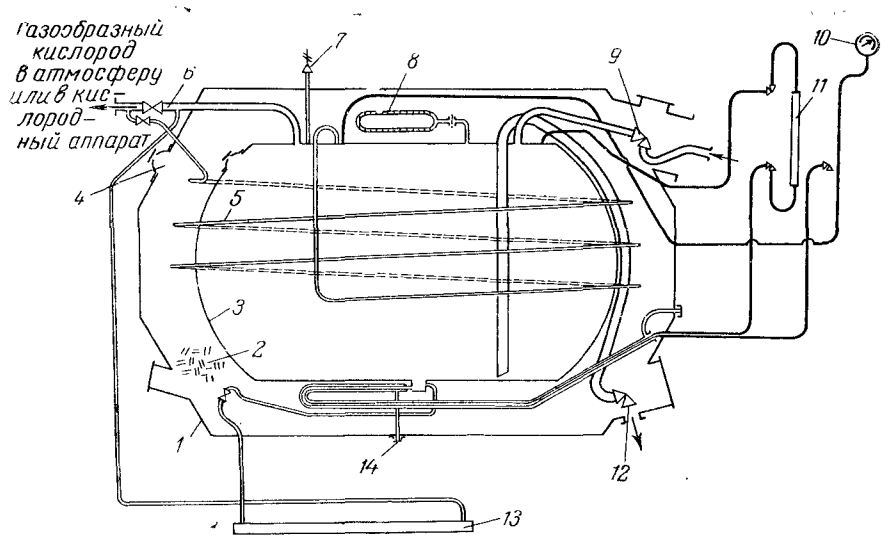



Рис. 10.3. Схема стационарной цистерны жидкого кислорода емкостью 6000 *дм*³
*1* — кожух; *2* — изоляция; *3* — сосуд для жидкого кислорода; *4* — предохранительная мембрана кожуха; *5* — змеевик; *6* — труба для отвода паров кислорода; *7* — предохранительный клапан; *8* — перфорированное кольцо; *9* — вентиль для наполнения цистерны кислородом; *10* — манометр; *11* — указатель уровня; *12* — вентиль для слива жидкости; *13* — испаритель; *14* — пробка для продувки отстойника.

На сосудах Дьюара снаружи наносятся краской отличительные полосы (для азота, аргона и воздуха — черная, для кислорода — голубая). Надпись с указанием названия газа (для азота и аргона — желтого цвета, кислорода — черного, воздуха — белого).

**Стационарная цистерна** (рис. 10.3) представляет собой тонкостенный сосуд *3*, подвешенный на цепях в кожухе *1* из листовой стали. Сосуд *3* изготовляется из латуни, алюминия, нержавеющей стали. Люк в верхней части сосуда предназначен для осмотра цистерны во время ремонта и очистки. Снизу с наружной стороны сосуд имеет отстойник для грязи и масла. От отстойника наружу выведена труба с пробкой *14* для продувки и удаления грязи. Нижней частью кожух опирается на подставку. Между стенками кожуха и сосуда находится слой насыпной вакуумно-порошковой изоляции *2*. Кожух снабжен съемной крышкой.



Сосуд наполняется жидким кислородом через вентиль *9*. Испаряющийся кислород возвращается обратно в конденсатор по трубе *6* в верхнюю часть сосуда. Слив жидкости производят через вентиль *12*, установленный на трубе, доходящей до дна сосуда *3*. К этому вентилю присоединяется гибкий металлический рукав, другой конец которого соединен с транспортным танком. Рукав снаружи покрыт гибкой металлической оплеткой. Жидкий кислород давлением паров в сосуде вытесняется через сливную трубу и вентиль *12* в транспортный резервуар.

Для повышения давления паров на время слива жидкости можно в испарителе *13* испарить часть жидкого кислорода. Жидкость поступает в испаритель по трубке через вентиль, а образующийся газ направляется в верхнюю часть сосуда через трубу *6*.

Для отвода газообразного кислорода в газгольдер служит змеевик *5*, проложенный в изоляции для ее охлаждения; в сосудах с насыпной изоляцией газообразный кислород поступает в изоляцию через перфорированное кольцо *8*. Вследствие этого при охлаждении воздуха, находящегося в порах изоляции, не образуется разрежения и в изоляцию не проникает извне влажный воздух (влага ухудшает изолирующие свойства).

Цистерна снабжена манометром *10* и указателем уровня жидкости *11* со шкалой, имеющей деление через каждые 10 *м*³, а также пружинной предохранительной мембраной *4*, рассчитанной на предельное давление сосуда. Указатель уровня наполнен четырехбромистым ацетиленом (тетрабромэтаном) или метиленбромидом.

Во время эксплуатации цистерны необходимо исключить попадание масла в арматуру, чаще проворачивать шпиндели и не открывать вентили до отказа, чтобы предотвратить примерзание шпинделей. Трубки указателя уровня жидкости периодически продувают. В установленные инструкцией по эксплуатации сроки люк вскрывают и сосуд подвергают внутреннему осмотру, тщательной очистке и в случае необходимости обезжириванию. После этого все коммуникации вместе с сосудом испытывают пневматически на герметичность при рабочем давлении. Восстанавливают вакуум откачкой изоляции.

Стационарные цистерны изготовляют емкостью до 500 *м*³, а в отдельных случаях и более. В зависимости от конструкции строятся цистерны цилиндрической (горизонтальные и вертикальные) и шарообразной формы. Основные параметры и размеры внутренних резервуаров для сжиженных газов регламентированы ГОСТ 16023—70.

**Транспортные резервуары.** Жидкий кислород перевозят в резервуарах с вакуумно-порошковой изоляцией. Транспортные резервуары имеют емкость до 35 000 *дм*³. Для перевозки резервуаров емкостью до 10 000 *дм*³ применяют грузовые машины без прицепов,

от 10 000 до 20 000 *дм*³ автоприцепы или полуприцепы. Резервуары емкостью от 30 000 до 35 000 *дм*³ транспортируют по железной дороге. Наиболее распространены транспортные резервуары емкостью от 300 до 8000 *дм*³.

Схема транспортного резервуара емкостью 1160 *дм*³ жидкого кислорода с вакуумно-порошковой изоляцией показана на рис. 10.4, а на рис. 10.5 — конструкция резервуара в разрезе.

Серийно выпускаемый транспортный резервуар ТРЖК-3 на 8000 *кг* жидкого кислорода устанавливают в кузове автомашины. Внутренний сосуд из нержавеющей стали Х18Н9Т толщиной 3 *мм* имеет цилиндрическую форму (днища сферические); объем 7,3 *м*³. Наружный кожух из сплава АМг-6 толщиной 8 *мм*. Изоляция вакуумно-порошковая из аэрогеля или перлита, толщина слоя 150 *мм*, рабочее избыточное давление в резервуаре до 2,5 *кгс/см*² (0,25 *Мн/м*²). Общий вес 3,15 *Т*, габариты 5 × 2 × 1,95 *м*. Потери на испарение 0,5% в сутки.

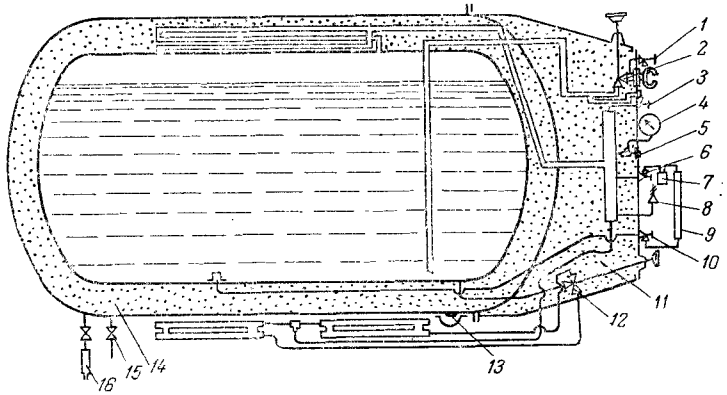



Рис. 10.4. Схема транспортного резервуара с вакуумно-порошковой изоляцией:
*1* — вентиль спуска газа из шланга; *2* — вентиль наполнения — опорожнения; *3* — вентиль спуска газа из трубы; *4* — манометр; *5* — предохранительная мембрана; *6* — вентиль указателя уровня; *7* — отделитель жидкости; *8* — предохранительный клапан; *9* — указатель уровня жидкости; *10* — вентиль указателя уровня; *11* — изоляция из мипоры; *12* — вентиль испарителя; *13* — предохранительная мембрана на кожухе; *14* — изоляция из аэрогеля (кремнегеля); *15* — вентиль вакуумный, сильфонный; *16* — лампа ЛТ-4М.

Транспортный резервуар ТРЖК-5 на 6000 *кг* жидкого кислорода используется в автомобильных газификационных установках АГУ-4 и АГУ-6. Резервуар горизонтальный, цилиндрический с эллиптическим днищем, сварной из стали Х18Н9Т; кожух из сплава АМг-6. Вес 2,86 *Т*, габариты 3,8 × 2 × 1,99 *м*. Изоляция вакуумно-порошковая из аэрогеля или перлита, слой изоляции 150 *мм*. При абсолютном остаточном давлении в изоляции 0,01 *мм рт. ст.* потери на испарение составляют 0,5% в сутки.

Фактическая величина испарения может отличаться от указанной в паспорте, так как зависит от состояния изоляции. На плохое состояние изоляции указывает наружное обмерзание кожуха, которое обычно начинается в верхней части вследствие оседания изоляционного материала. Резервуар, кожух которого сильно обмерз, нельзя эксплуатировать. Необходимо пополнить изоляцию



в кожухе, восстановить вакуум в изоляционном пространстве или заменить изоляцию новой.

Чем больше емкость цистерны, тем меньше относительная потеря жидкого кислорода на испарение. С уменьшением степени заполнения цистерны жидкостью относительная потеря жидкого кислорода на испарение возрастает.

Потери во время хранения и слива возникают по следующим причинам:

1. Потери от испарения при сливе жидкого кислорода из конденсатора из-за дросселирования, в размере 3—4% количества сливаемой жидкости. Эти потери могут быть уменьшены путем переохлаждения жидкого кислорода, сливаемого из конденсатора.

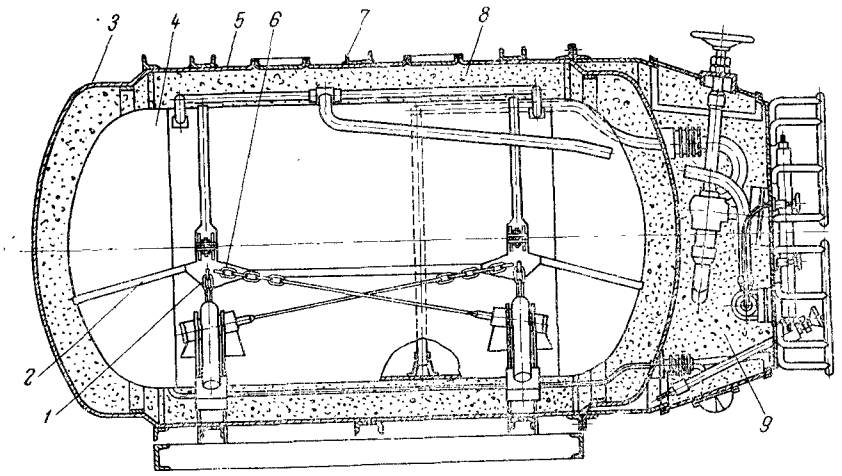



Рис. 10.5. Транспортный резервуар на 1160 *дм*³ жидкого кислорода с вакуумно-порошковой изоляцией:
*1* — вертикальные цепи; *2* — подвеска; *3* — днище кожуха; *4* — резервуар; *5* — кожух; *6* — продольные цепи; *7* — сварная ферма; *8* — аэрогель или кремнегель; *9* — мипора.

2. Потери от испарения в сливных трубопроводах. Уменьшить эти потери можно путем переохлаждения кислорода, сокращения длины трубопроводов и улучшения их изоляции.

3. Потери от испарения при охлаждении транспортных емкостей во время наполнения. Эти потери могут быть сокращены, если для предварительного охлаждения цистерн использовать холодные пары, образующиеся при заполнении других транспортных емкостей, а также сократить простои охлажденных цистерн.

4. Потери от испарения в сливных шлангах, коммуникациях, фильтрах и других частях, составляющие 0,5—1,2% объема наполняемой емкости.

Величина потерь может колебаться в зависимости от местных условий (исправности разливочных устройств, скорости наполне-

ния и др.). С увеличением скорости заполнения емкости жидки кислородом относительные потери на испарение жидкости сокр щаются.

Ориентировочные потери на испарение жидких газов характ ризуются следующими данными:

| Процесс | Кислород | Азот | Арго |
|---|---|---|---|
| При подаче по трубопроводу, *кг/ч* на 1 *пог.м* трубы | | | |
| с изоляцией стекловолокном | 1,18 | 1,3 | 1,[illegible] |
| с вакуумно-порошковой изоляцией | 0,16 | 0,17 | 0,[illegible] |
| При передавливании жидкости испарением газа, *кг/т* жидкости | 14,0 | 17,0 | 15,[illegible] |
| Испарение жидкости при работе поршневого насоса, % производительности насоса | | | |
| непогружного | 10 | 10 | 10 |
| погружного, установленного на питающей емкости | 5 | 5 | 5 |
| погружного, установленного на специальной емкости | 10 | 10 | 10 |

Потери жидкости на охлаждение транспортных емкостей, *кг/емкость*

| | | | |
|---|---|---|---|
| ТРЖК-4 | 52 | 58 | 68 |
| ТРЖК-2У | 150 | 170 | 200 |
| ТРЖК-7М | 200 | 230 | 270 |
| ТРЖК-5 | 430 | 470 | 560 |
| ТРЖК-3 | 575 | 650 | 770 |
| ЦКТ-1 | 1950 | 2250 | 2600 |
| 8Г-513 | 3500 | 4000 | 4600 |

Потери жидкости при хранении в емкости, *кг/ч*

| | | | |
|---|---|---|---|
| ТРЖК-4 | 0,45 | 0,50 | 0,[illegible] |
| ТРЖК-2У | 0,75 | 0,80 | 1,[illegible] |
| ТРЖК-7М | 0,80 | 0,85 | 1,[illegible] |
| ТРЖК-5 | 1,5 | 1,6 | 2,[illegible] |
| ТРЖК-3 | 1,7 | 1,8 | 2,[illegible] |
| ЦКТ-1 | 1,85 | 1,95 | 2,5 |
| 8Г-513 | 4,25 | 4,50 | 6,[illegible] |

Потери сжиженного газа при наполнении холодных цистер определяют по формуле

$$G = gt$$

где $G$ — потери при наполнении одной емкости, *кг*;
$g$ — потери при хранении жидкости в данной емкости, *кг/ч*;
$t$ — время, прошедшее после опорожнения емкости, *ч*.

Эффективным способом снижения потерь жидкого кислород при хранении и переливании является переохлаждение жидкост ниже температуры кипения при данном давлении. Если, наприме требуется переохладить кислород на 10 °С, то для этого от жид кого кислорода нужно отнять $0{,}4 \cdot 10 = 4$ *ккал/кг* [где 0,4 — теплоем кость жидкого кислорода в *ккал/(кг·град)*]. Скрытая теплот испарения жидкого кислорода равна примерно 50 *ккал/кг*. Следо вательно, переохлаждая жидкий кислород на 10 *град* ниже точк кипения при данном давлении, можно снизить потери на испаре ние в размере $4 : 50 = 0{,}08$ *кг/кг*, т. е. на 8%.

Переохлаждение кислорода осуществляется с помощью какой либо другой жидкости или газа, имеющих более низкую темпера туру: газообразного азота, жидкого азота, жидкого воздуха и др Переохлаждение специальным холодильным циклом связано с до полнительной затратой энергии и может быть оправдано только



в тех случаях, когда требуется сохранить возможно большее количество кислорода в жидком виде в течение продолжительного времени.

В крупных стационарных и транспортных емкостях можно применить специальную холодильную установку для повторной конденсации испаряющегося кислорода. В этом случае количество холода, необходимого для конденсации 1 *кг* паров кислорода, составляет примерно 60—70% количества холода, требуемого для получения 1 *кг* жидкого кислорода из воздуха. Поэтому расход энергии на пополнение убыли жидкого кислорода в цистерне от испарения будет меньше количества энергии, которая потребовалась бы для выработки соответствующего количества жидкого кислорода.

Жидкий кислород обладает свойством перегреваться. Явление перегрева наступает быстрее в том случае, когда жидкий кислород хранится в сосудах с очень хорошей изоляцией и с гладкими стенками (например, в стеклянных сосудах Дьюара). Перегрев, если он достигает значительной величины и захватывает бо́льшую часть жидкости, может привести к внезапному вскипанию жидкости и повышению давления в сосуде.

Однако в практических условиях хранения жидкого кислорода заметного перегрева не бывает, так как он ликвидируется образующимися на стенках сосуда центрами парообразования, около которых возникают пузырьки пара, барботирующие через слой жидкого кислорода и способствующие его интенсивному перемешиванию. Образование пузырьков происходит при наличии неровностей на внутренних стенках сосуда: сварных швов, рисок, а также колпачков, специально привариваемых для этой цели.

В этих условиях перегрева кислорода не бывает.

**Обслуживание цистерн.** При наполнении транспортного резервуара жидким кислородом закрывают вентиль для повышения давления и открывают вентиль на трубе для выпуска газообразного кислорода в атмосферу или газгольдер, а также вентили к указателям уровня жидкости. Затем стационарный и транспортный резервуары соединяют гибким шлангом, поднимают давление в опорожняемом резервуаре до установленной величины и открывают на обоих сосудах вентили для слива жидкости. Во время наполнения необходимо следить за показаниями манометра и указателя уровня жидкости. Давление в резервуарах не должно превышать минимальной величины, установленной паспортом. Нельзя допускать наполнения резервуара жидким кислородом сверх установленного количества.

При заполнении часть жидкого кислорода испаряется вследствие охлаждения металла и изоляции цистерны. Чтобы уменьшить испарение, заливку жидкого кислорода следует производить после предварительного охлаждения цистерны холодными парами кислорода. Кислород, испарившийся при наполнении цистерны, отводят по шлангу в газгольдер.

Наполненные транспортные резервуары необходимо выдержать некоторое время, чтобы они полностью охладились. Затем их доливают жидким кислородом и отправляют по назначению. Во время перевозки и стоянки наполненного резервуара вентиль для выпуска паров кислорода в атмосферу должен быть открыт. Если в процессе переливания жидкости из одного сосуда в другой давление в опорожняемом резервуаре понизится, его следует вновь поднять до первоначальной величины. Во время переливания жидкости вентиль для выпуска газа в атмосферу или в газгольдер на опорожняемом резервуаре должен быть закрыт, а на наполняемом открыт.

При прекращении наполнения необходимо сначала закрыть вентиль слива на наполняемом сосуде, затем закрыть вентиль на опорожняемом резервуаре, спустить избыток газа из гибкого шланга в газгольдер и, только убедившись в отсутствии давления паров кислорода в шланге, осторожно отсоединить его от стационарного и транспортного резервуаров. Эти операции следует производить по возможности быстро, чтобы в шланге не могло повыситься давление от испарения остатков жидкого кислорода. При разъединении шланга после наполнения необходимо соблюдать особую осторожность во избежание ожогов жидким кислородом частей тела, не защищенных одеждой, или ударов при внезапном срыве шланга.

Иногда масло из детандера попадает в кислородный аппарат и в виде твердых частиц заносится в сосуд вместе с жидким кислородом. Поэтому цистерны приходится периодически отогревать, осматривать изнутри и при наличии отложений масла промывать растворителем, затем продувать сухим воздухом или азотом.

Обезжиривание сосудов для жидкого кислорода производится после их изготовления, ремонта и освидетельствования, а также в процессе эксплуатации, если они использовались для жидкого кислорода, содержащего масла более 0,01 *мг/дм*³. При меньшем содержании масла в жидком кислороде емкости не обезжиривают. Если содержание масла превышает 0,01 *мг/дм*³, то сосуд нужно обезжиривать, когда

$$\frac{nVc}{F} = 500 \qquad (10.2)$$

где $n$ — число заполнений емкости;
$V$ — объем жидкого кислорода, заливаемого в емкость, *дм*³;
$c$ — содержание масла в жидком кислороде, *мг/дм*³;
$F$ — внутренняя поверхность сосуда, *м*².

Если в паспорте сосуда не отмечено число заполнений и содержание масла в жидком кислороде, то обезжиривание следует производить через каждые 6 месяцев.

Для обезжиривания применяют четыреххлористый углерод, трихлорэтилен или тетрахлорэтилен, а также горячие моющие растворы. Сосуды до 100 *дм*³ обезжиривают заполнением растворителем на $^1/_3$ объема с последующим вращением или покачиванием сосуда. При использовании горячего моющего раствора обезжиривание производят струйным методом или заполнением всего сосуда. Более крупные сосуды обезжиривают методом конденсации паров органического растворителя на их внутренних поверхностях, предварительно отогретых до 15—20 °С. Испарители цистерн снимают и обезжиривают отдельно. Обезжиривание заканчивают при содержании масла в сливаемом конденсате растворителя не более 20 *мг/дм*³. Расход растворителя при обезжиривании этим способом составляет 5—10 *дм*³ на 1 *м*² обезжириваемой поверхности сосуда.



Для обезжиривания сосудов способом конденсации паров растворителя масла на обезжириваемой поверхности можно использовать фреон-113 (расход 3 *дм*³ на 1 *м*² поверхности). Применение спирта для обезжиривания этим способом может дать положительный результат только при обработке слабо загрязненных сосудов (не более 0,5 *г* масла на 1 *м*²) и при расходе растворителя не менее 3 *дм*³/*м*².

Емкости, снабженные люками, можно обезжиривать обмыванием их стенок струями горячего моющего раствора (что наиболее эффективно) или протиркой хлопчатобумажными салфетками, смоченными раствором. Остатки раствора удаляют через нижний слив. Испаритель и коммуникации нижнего слива повторно промывают чистым моющим раствором.

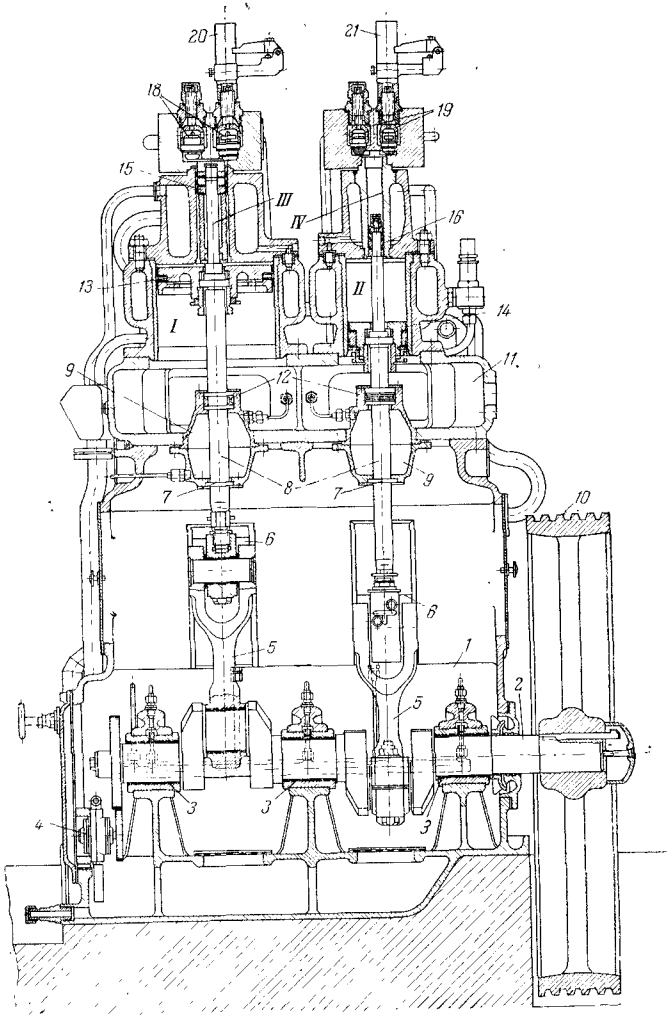
Для обезжиривания арматуры, металлических рукавов, баллонов и т. п. можно применять также моющие препараты типа МЛ, «Дон», «Прогресс», «Астра» и др. Обезжиривание производят водными растворами, содержащими не менее 50 *г* препарата на 1 *л* раствора; изделия промывают погружением в ванны, струйной промывкой, циркуляцией.

Качество обезжиривания проверяют протиркой поверхности чистым листом белой бумаги, на котором не должно оставаться следов масла. После обезжиривания резервуар продувают азотом или воздухом, не содержащим масла, до полного удаления запаха растворителя в продувочном газе.

При использовании органических растворителей следует строго соблюдать установленные правила техники безопасности. Работы по обезжириванию цистерн органическими растворителями необходимо производить в защитных масках или в респираторах, снабженных трубкой для подвода свежего воздуха в зону дыхания.

## 10.3. ПОРШНЕВЫЕ КОМПРЕССОРЫ ДЛЯ СЖАТИЯ КИСЛОРОДА

**Особенности конструкции.** Кислородные компрессоры несколько отличны от воздушных компрессоров, что объясняется способностью кислорода при контакте с маслом иногда вызывать вспышку.



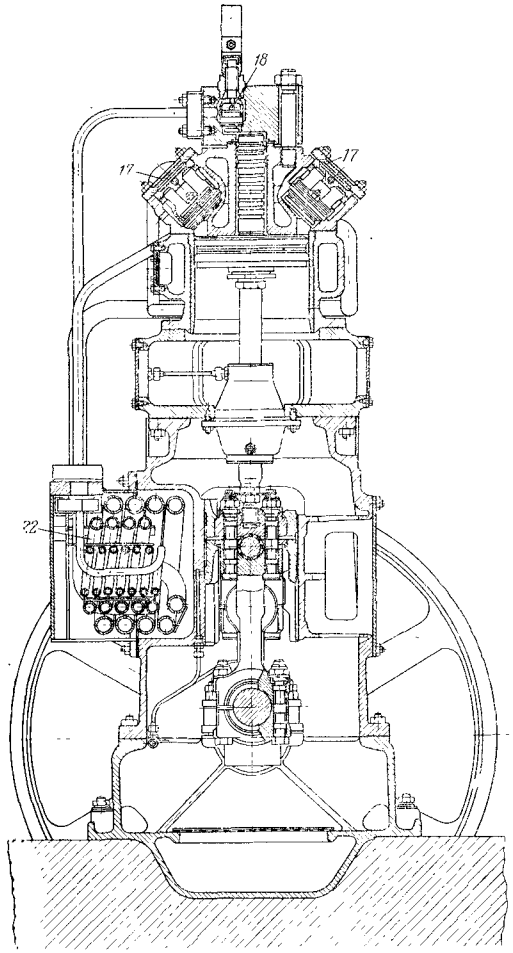




Рис. 10.6. Кислородный компрессор 2РК-1,5/220:

*1* — картер; *2* — вал; *3* — коренные подшипники; *4* — масляный н
*6* — ползуны; *7* — маслослизывающие сальники; *8* — штоки; *9* —
*12* — газоуплотняющие сальники; *13, 14, 15, 16* — поршни соответ
ные клапаны; *20, 21* — предохранительны

ос для смазки шатунно-кривошипного механизма; *5* — шатуны;
ерные коробки; *10* — шкив-маховик; *11* — промежуточный фонарь;
ению I, II, III и IV ступеней; *17, 18, 19* — всасывающие и нагнетатель-
лапаны III и IV ступеней; *22* — холодильники.

Вероятность загорания тем больше, чем выше давление и температура кислорода, так как при этом масло окисляется кислородом значительно интенсивнее. Вследствие этого нельзя применять масло для смазки цилиндров кислородных компрессоров, что исключает возможность использования в цилиндре кислородного компрессора чугунных колец в качестве уплотнителей поршней.

Поршни кислородных компрессоров для уплотнения снабжаются фибровыми манжетами, а для смазки цилиндров применяют чистую дистиллированную воду, которая не содержит минеральных солей, растворенных в обычной воде и образующих накипь на рабочих поверхностях цилиндров и клапанов. Иногда к дистиллированной воде прибавляют 7—8% химически чистого глицерина, что удлиняет срок службы манжет*. Средняя скорость движения поршня с фибровыми манжетами должна быть не выше 1—1,5 *м/сек*.

Для сжатия газообразного кислорода целесообразнее использовать вертикальные компрессоры, так как в этом случае износ фибровых манжет более равномерен. Применяются также компрессоры с бронзовыми поршневыми кольцами, смазываемыми водно-мыльной эмульсией, и компрессоры с поршневыми кольцами из графита, не требующими смазки.

В вертикальном четырехступенчатом кислородном компрессоре 2РК-1,5/220 (рис. 10.6) III ступень расположена над I ступенью, а IV ступень — над II ступенью. Поршни уплотнены фибровыми манжетами. Холодильники вынесены и размещены сбоку станины. Между станиной и цилиндрами расположен промежуточный фонарь, в котором находятся буферные коробки с газоуплотняющими и маслослизывающими сальниками. Эти сальники препятствуют утечке кислорода наружу и предохраняют от попадания масла по штоку из механизма движения в цилиндры. Смазка шатунно-кривошипного механизма производится под давлением от шестеренчатого масляного насоса. Картер компрессора служит резервуаром для масла.

Изготовляются трехступенчатые вертикальные кислородные компрессоры с рядовым расположением цилиндров, более удобные для обслуживания и ремонта. Трехрядный компрессор типа КЗР-5/165 показан на рис. 10.7, а на рис. 10.8 дана конструкция поршней I и III ступеней этого компрессора. Поршни I и II ступеней имеют по две манжеты, поршень III ступени — три манжеты; манжеты I ступени направлены в разные стороны, а I и III ступеней — в одну сторону (вверх).

На шатунно-кривошипной базе компрессора КЗР-5/165 создан компрессор КЗР-10/30 на конечное избыточное давление 30 *кгс/см*

* При использовании глицерина необходимо следить за тем, чтобы в нем не было следов масла, так как это может привести к вспышке в цилиндре компрессора.

В последние годы большинство выпускаемых кислородных компрессоров снабжаются цилиндровыми втулками из нержавеющей стали; в таких компрессорах износ манжет незначителен и применение глицерина не требуется.



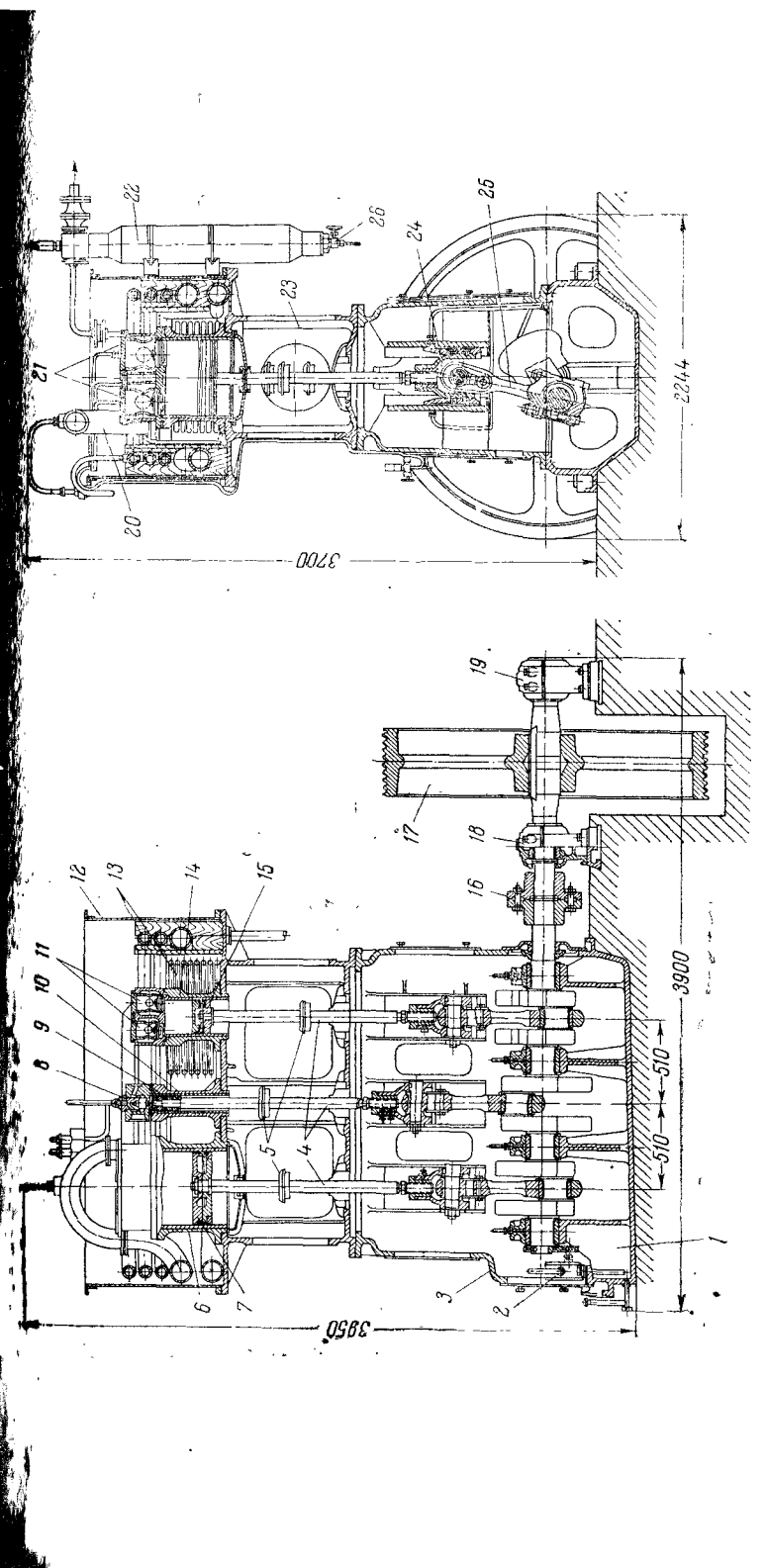



Рис. 10.7. Кислородный компрессор КЗР-5/165:

*1* — картер; *2* — масляный шестеренчатый насос; *3* — станина; *4* — штоки; *5* — соединительные фланцы штоков; *6* — цилиндр I ступени; *7* — поршень I ступени; *8* — комбинированный клапан III ступени; *9* — поршень III ступени; *10* — цилиндр III ступени; *11* — всасывающий и нагнетательный клапаны II ступени; *12* — вана холодильников; *13* — змеевики холодильников; *14* — цилиндр II ступени; *15* — поршень II ступени; *16* — соединительная муфта; *17* — шкив-маховик; *18*, *19* — выносные подшипники; *20* — всасывающая труба I ступени; *21* — всасывающий и нагнетательный клапаны I ступени; *22* — влагоотделитель; *23* — промежуточный фонарь; *24* — крейцкопф; *25* — шатун; *26* — вентиль продувки влагоотделителя.

производительностью 600 $м^3/ч$; в этом компрессоре цилиндр I ступени двойного действия.

Техническая характеристика поршневых кислородных компрессоров приведена в табл. 10.1.

Части кислородных компрессоров, соприкасающихся со сжатым влажным кислородом, изготовляются из латуни, бронзы и нержавеющей стали во избежание быстрого их износа от коррозии; поршни и втулки цилиндров — из бронзы марки ОЦСН-3-7-5-1. Поршни цилиндров I и II ступеней иногда изготавливают также из серого чугуна, а втулки цилиндра I ступени — из перлитного чугуна. Цилиндры I и II ступеней отливают из чугуна, а цилиндры III и IV ступеней — из углеродистой стали или высокопрочного чугуна Сч-21-40.

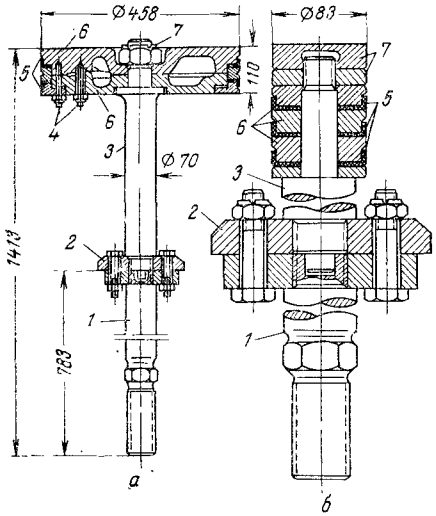



Рис. 10.8. Поршни кислородного компрессора КЗР-5/165 первой (*а*) и третьей (*б*) ступеней:

*1* — нижняя часть штока; *2* — фланцевое соединение; *3* — верхняя часть штока; *4* — шпильки; *5* — фибровые манжеты; *6* — диски; *7* — гайка.

Головки цилиндров I и II ступеней изготовляют из чугуна; головки цилиндров III и IV ступеней — из латуни марки ЛЖМц-59-1-1 или из нержавеющей стали марки 3Х13; клапанные коробки — из бронзы марки ОЦСН-3-7-5-1 или нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т; пружины клапанов — из бронзы марки КМц-3-1, пластины клапанов — из нержавеющей стали марки 3Х13; штоки поршней — из нержавеющей стали 3Х13; седла клапанов — из бронзы марки ОЦСН-3-7-5-1 или из нержавеющей стали марки 3Х13. Трубки для холодильников применяются медные; коллекторы и трубные решетки изготовляются из латуни. Для уплотнения сальников, в зависимости от конструкции компрессора, применяются бронзовые кольца с наплавкой баббитом, кожаные манжеты, графитовые и фторопластовые кольца.

Компрессор 2РК-1,5/220 серийного выпуска имел конструктивные недостатки, осложнявшие его ремонт. В связи с этим на ряде заводов в его конструкцию внесены изменения, оправдавшие себя на практике: вместо одинарных поршневых манжет применяют двойные манжеты из фибры толщиной 1,5—2 *мм*, собираемые на поршне в одно целое; бронзовые втулки I и II ступеней заменены втулками, сваренными из листовой нержавеющей стали 1Х18Н9Т толщиной 20 *мм* или из стали 3Х13; вместо кожаных применяют мягкие сальниковые набивки из шнурового асбеста, пропитанного



**Таблица 10.1. Техническая характеристика кислородных компрессоров**

| Показатели | Вертикальные | | | | | | | | | Горизонтальный 5Г-60/15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | КПК-6 | 2РК-4/5 | 2РК-1,5/220 | КЗР-10/30* | КЗР-5/165* | КВ-0,7/220 | ЗЭК-30/64* | | | |
| Производительность, $м^3/ч$ | 220—240 | 220 | 90 | 600 | 300 | 37—40 | 1800 | | | 3600 |
| Избыточное давление нагнетания, $кгс/см^2$ | 15 | 5 | 220 | 30 | 165—180 | 220 | 64 | | | 15 |
| Избыточное давление нагнетания I ступени, $кгс/см^2$ | 3,5 | — | — | 3,35 | 5,7—6 | — | — | | | — |
| Температура всасывания, °С, не более | 40 | 35 | 40 | 25 | 32—33 | — | — | | | 35 |
| Температура охлаждающей воды на входе, °С, не более | 40 | 25 | 28 | 20 | 25 | 28 | — | | | 25 |
| Число оборотов в 1 *мин* | 500 | 240 | 240 | 130 | 130 | 750 | 355 | | | 167 |
| Число ступеней | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | | | 2 |
| Число цилиндров | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | | | 2 |
| Диаметр цилиндров, *мм* | | | | | | | | | | |
| I ст. | 280 | 2×320 | — | 480 | 460 | 140 | — | | | — |
| II ст. | 140 | — | — | 370 | 200 | 80 | — | | | — |
| III ст. | — | — | — | 200 | 85 | 36 | — | | | — |
| IV ст. | — | — | — | — | — | 22 | — | | | — |
| Ход поршня, *мм* | 150 | 150 | 150 | 300 | 300 | 120 | — | | | — |
| Уплотнение поршней | Графитовые кольца | Фибровые манжеты | Фибровые манжеты | Фибровые манжеты | | Бронзовые кольца | Графитовые кольца | | | Бронзовые кольца |

*Продолжение*

| Показатели | Вертикальные | | | | | | | Горизонтальный 5Г-60/15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | КПК-6 | 2РК-4,5 | 2РК-1,7/20 | КР-10/30* | КЗР-5/165* | КВ-0/220 | ЗЭК-0/64* | |
| Смазка цилиндров | Без смазки | Дистиллированная вода + глицерин | | Дистиллированная вода | | Мыльная эмульсия | Без смазки | Мыльная эмульсия |
| Расход смазки для цилиндров, *дм³/ч* | — | 10 | 8 | 90—120 | 45—60 | 1,5—2 | — | 150—200 |
| Потребляемая мощность на валу, *квт* | 42 | 20 | 23,5 | 96,8 | 75 | 14,2 | — | 425 |
| Привод | Клиноременный | | | Клиноременный | | Электродвигатель на валу компрессора | Клиноременный | Электродвигатель на валу компрессора |
| Тип ремня | Г | В | — | — | — | — | — | — |
| Количество ремней | 5 | 5 | — | — | — | — | — | — |
| Расход охлаждающей воды при $\Delta t = 5$ *град*, *м³/ч* | 8 | 5 | 4,5 | 18,4 | 14,5 | 2 | 16 | 45 |
| Вес компрессора, *т* | 3 | 2,8 | 2,8 | 12,1 | 11,22 | 1,6 с электродвигателем; вес блока осушки 0,47 | | 31 |
| Мощность электродвигателя, *квт* | 55 | 25 | 40 | 115 | 115 | 25 | 560 | 625 |
| Вес электродвигателя, *т* | 0,555 | 0,510 | 0,42 | 2,06 | 2,06 | — | — | 11,55 |



графитом, не требующие водяной смазки; мембранно-пружинные клапаны заменены пружинными, с пластинами из нержавеющей стали; крепежные детали из углеродистой стали заменены деталями из нержавеющей стали.

Как уже указывалось, особую опасность представляет попадание масла в цилиндры кислородных компрессоров; по этой причине возникали вспышки, особенно в цилиндрах III и IV ступеней. Масло попадает в кислородный компрессор при неаккуратной сборке и ремонте. Поэтому для ремонта и хранения деталей кислородного компрессора необходимо отвести специальные рабочие места и шкафы и содержать их в чистоте.

Детали, соприкасающиеся с кислородом, следует перед установкой в компрессор предварительно обезжирить и тщательно просушить.

Масло может случайно попасть в кислородный компрессор и с дистиллированной водой, применяемой для смазки цилиндров. Во избежание этого необходимо строго следить за чистотой резервуаров и трубок для хранения и подачи дистиллированной воды в компрессор.

Высота колена трубки, через которую поступает дистиллированная вода, должна на 50—100 *мм* превышать величину разрежения (в *мм вод. ст.*), создаваемого поршнем во всасывающей трубе компрессора, иначе в компрессор может засасываться атмосферный воздух и загрязнять кислород.

Обычно разрежение во всасывающей трубе составляет 200—250 *мм вод. ст.*, и поэтому высота колена трубки принимается 300—350 *мм*.

Нормы подачи дистиллированной воды указаны в табл. 10.1. Избыток воды может вызвать в компрессоре гидравлический удар, недостаточная подача воды приводит к быстрому износу манжет. Дистиллированная вода, применяемая для смазки цилиндров кислородных компрессоров, представляет собой чистую «мягкую» воду, не содержащую растворенных солей, способных давать накипь; вода должна быть тщательно профильтрована и не содержать примесей в виде твердых взвешенных частиц. Расход дистиллированной воды в компрессоре составляет 10—15 *л* на каждые 100 *м³* кислорода.

На некоторых заводах для смазки кислородных компрессоров применяют отфильтрованную водопроводную воду, если ее жесткость не превышает 3,0—3,5 *мг-экв/дм³*. Применяется также вода, умягченная при помощи сульфоугля* марки К. Умягчение производится в заполненных сульфоуглем фильтрах, которые переключают при повышении жесткости воды до 0,05—0,06 *мг-экв/дм³*. Уголь в отработанном фильтре регенерируют водным раствором поваренной соли. Жесткость воды после регенерации фильтра не превышает 0,03 *мг-экв/дм³*. Необходимо следить за тем, чтобы

* Уголь, обработанный крепкой серной кислотой (олеумом).

в умягченную воду не попала поваренная соль, так как она может вызвать повышенную коррозию стенок кислородных баллонов, если в них накапливается вода (в тех случаях, когда кислород не подвергается осушке от влаги).

Для смазки кислородных компрессоров может применяться также вода, умягченная ионитами.

Для улавливания дистиллированной воды и кислорода, теряемых при продувке водоотделителя кислородного компрессора, применяется специальное устройство (рис. 10.9). Водоуловитель должен иметь достаточный запас прочности, исключающий разрыв его в случае внезапного повышения давления во время продувки.

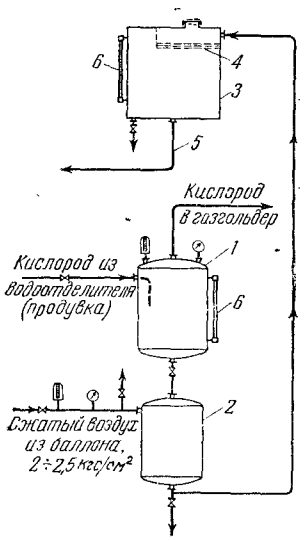



Рис. 10.9. Схема устройства для улавливания дистиллированной воды и кислорода:

1 — водоуловитель; 2 — сборник дистиллированной воды; 3 — напорный бак с дистиллированной водой; 4 — фильтр; 5 — трубка; 6 — водомерные стекла.

Сборник дистиллированной воды рекомендуется изготовлять из латуни, меди или нержавеющей стали, при изготовлении сборников из углеродистой стали внутренняя поверхность лудится.

Продувка влагоотделителей кислородных компрессоров и обезвоживание сжатого кислорода могут быть автоматизированы. На Балашихинском кислородном заводе разработан аппарат для автоматического удаления влаги, выделяющейся во влагоотделителях компрессора*. В корпусе *1* (рис. 10.10, *а*), изготовленном из баллона диаметром 219 *мм*, находится открытый поплавок *2* из латуни толщиной 1,5 *мм*. Снизу на поплавке укреплена тяга *3*, соединенная с одним концом рычага *4;* второй конец рычага закреплен шарнирно в вилке. На рычаге находится подвижный клапан *5*. Рычажная полость представляет собой трубу высокого давления. Жидкость из влагоотделителя сливается в рычажную полость и заполняет поплавковую камеру. При определенном уровне жидкости в баллоне поплавок поднимается, и жидкость автоматически продувается. Аппарат изготовляется в соответствии с правилами Госгортехнадзора. Включение аппарата в сеть показано на рис. 10.10, *б*.

Схема обезвоживания газообразного кислорода с использованием аппаратов для автоматической продувки влагоотделителей показана на рис. 10.11. Аналогичные аппараты применяются также для автоматической продувки влаго-маслоотделителей воздушных компрессоров.

* Г. А. Гитцевич, Труды ВНИИкимаш, вып. 11, 1967.



Масло может попасть в цилиндр кислородного компрессора по штоку с ползуна и шатуна, сочленения которых смазываются машинным маслом. На практике наблюдались вспышки в цилиндрах вследствие попадания в них масла по штоку компрессора. Для предупреждения этого под цилиндром каждой ступени ставится маслоулавливающий сальник. При обслуживании компрессора

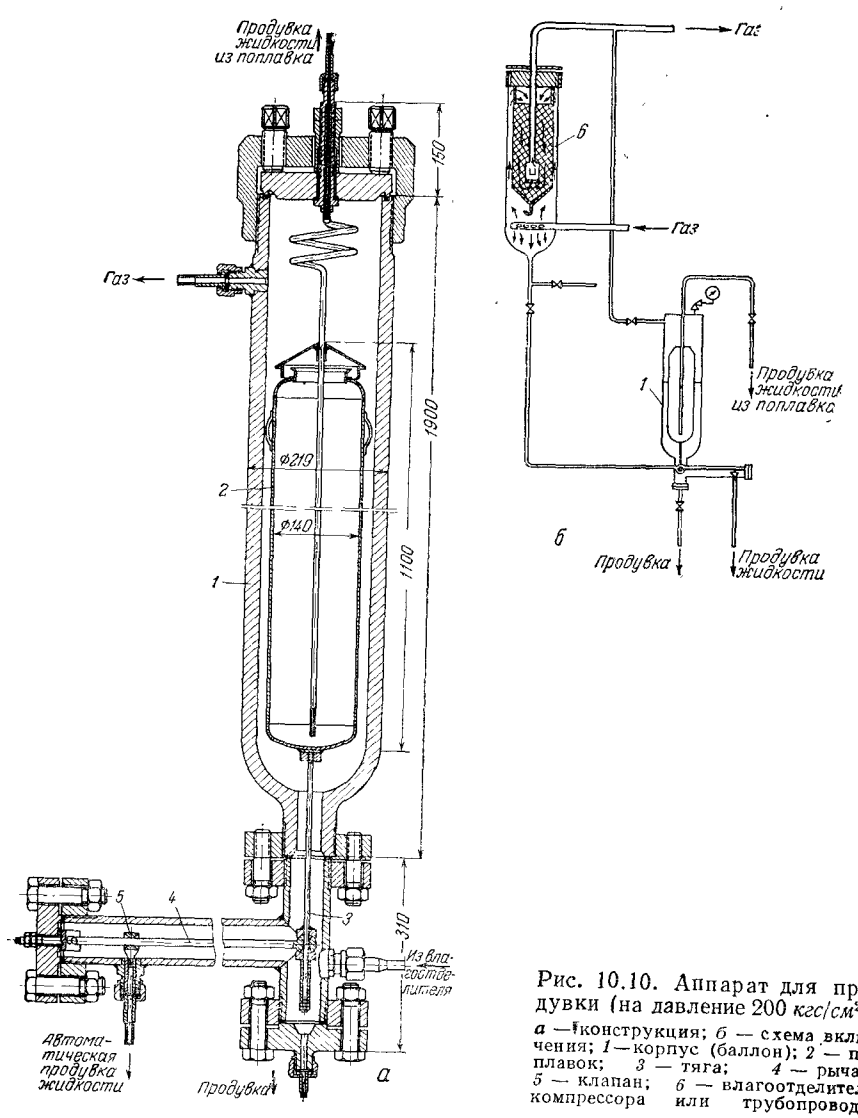



Рис. 10.10. Аппарат для продувки (на давление 200 *кгс/см²*).

*а* — конструкция; *б* — схема включения; *1* — корпус (баллон); *2* — поплавок; *3* — тяга; *4* — рычаг; *5* — клапан; *6* — влагоотделитель компрессора или трубопровода.

необходимо постоянно следить за состоянием сальника и своевременно заменять его набивку.

Кислородные компрессоры с эмульсионной смазкой. В некоторых поршневых кислородных компрессорах низкого и среднего давления поршни уплотняются кольцами из латуни ЛЖМц-59-1-1 для I ступени и оловянисто-фосфористой бронзы ОФ-7,5-0,4 или ОФ-10-1 для II ступени. Кольца из латуни ЛЖМц-59-1-1 пригодны для всех ступеней, но для повышения стойкости их наплавляют слоем баббита (марки Б-83) толщиной 3 *мм*. Втулки цилиндров при металлических кольцах изготовляются

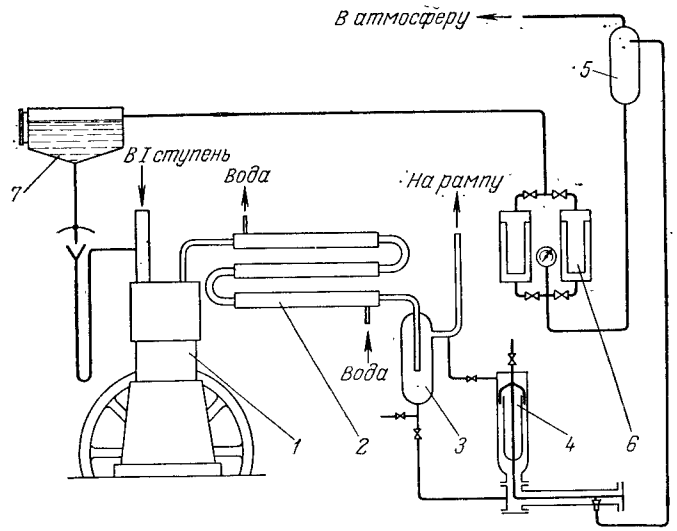



Рис. 10.11. Схема обезвоживания газообразного кислорода:
*1* — кислородный компрессор; *2* — концевой холодильник; *3* — влагоотделитель; *4* — аппарат для продувки; *5* — отделитель влаги; *6* — фильтры; *7* — напорный бак.

из перлитного чугуна. Поршень с металлическими кольцами может иметь более высокую среднюю скорость (3,0—3,5 *м/сек*), чем при применении фибровых манжет. Смазка цилиндров кислородных компрессоров с металлическими кольцами производится мыльной эмульсией.

При эмульсионной смазке следует применять холодильники из нержавеющей стали, так как осадки эмульсии могут вызвать коррозию латунных и медных деталей.

Компрессоры с эмульсионной смазкой используются также для получения сжатого обезжиренного воздуха. Для этого предназначен компрессор КВ-0,7/222 конструкции ВНИИкриогенмаш (см. (табл. 10.1). Это вертикальный, двухрядный, четырехступенчатый компрессор простого действия, крейцкопфный, с водяным охлаждением. Воздух после компрессора подвергается адсорбционной



сушке от влаги и фильтрации от механических частиц. Коленчатый вал выполнен разъемным, опирается коренными шейками на роликоподшипники. Такие же подшипники установлены на мотылевых шейках вала и являются опорами кривошипных головок шатуна. В теле крейцкопфа расположены камеры с коническими роликоподшипниками, служащими опорами для пальца, запрессованного в головку шатуна.

В блок чугунных цилиндров I и II ступеней запрессованы стальные втулки с цементированной рабочей поверхностью. Цилиндры III и IV ступеней латунные и в них также запрессованы стальные втулки с цементированной поверхностью. Клапаны I и II ступеней — кольцевые пластинчатые (типа Гербигера) с кольцевой уплотнительной пластинкой из бериллиевой бронзы; клапаны III и IV ступеней — тарельчатые, имеют полусферические штампованные пластины из нержавеющей стали. Поршневые кольца изготовлены из фосфористой бронзы и смазываются кислородостойкой эмульсией калийного мыла, подаваемой во всасывающие линии через контрольные глазки. В I ступень эмульсия подается самотеком из бачка, а в III ступень — от двух пневмолубрикаторов, работающих попеременно.

Мыльную эмульсию готовят из специального жидкого калийного мыла* следующего состава (%):

| | |
|---|---|
| Глицерин дистиллированный (ГОСТ 6824—54*) первого сорта, в пересчете на 100%-ный | 10 |
| Подсолнечное масло (ГОСТ 1129—55*) или хлопковое масло (ГОСТ 1128—55*) | 22 |
| Касторовое масло техническое (ГОСТ 6757—53) | 9,5 |
| Едкое кали техническое (ГОСТ 9285—69), в пересчете на 100%-ный | 6,5 |
| Натрий фосфорнокислый однозамещенный, кристаллический, чистый (ГОСТ 245—66) | 1,0 |
| Бета-нафтол кристаллический, чистый (ГОСТ 5835—70) | 0,25 |
| Вода дистиллированная (ГОСТ 6709—53) | 50,75 |

Жидкое калийное мыло должно содержать не менее 28% жирных кислот, не более 0,15% (от массы жирных кислот) неомыленного жира, 0,1—0,25% и свободной едкой щелочи (КОН). При растворении смазки в 4 частях дистиллированной воды при 15 °С не должно образовываться осадка в течение 24 *ч*, но допускается появление легкой мути. Смазка имеет светло-желтый цвет, должна быть однородной, подвижной и прозрачной. Фосфорнокислый натрий является антикоррозионной добавкой, бета-нафтол — антиокислителем.

Из жидкой смазки (калийного мыла) на месте потребления готовят мыльную эмульсию состава: на 100 *дм*$^3$ дистиллированной воды берут 70 *г* смазки и 25 *см*$^3$ водного раствора едкого кали плотностью 1,3 *г/см*$^3$. Чтобы избежать неполного растворения смазки, ее следует предварительно развести в стеклянном сосуде, а затем слить в бак с дистиллированной водой и туда добавлять раствор едкого кали. Смесь тщательно перемешивают. Эмульсия

* ВТУ 282—57 парфюмерной фабрики «Свобода» (Москва).

должна получиться прозрачной; помутнение указывает на плохое качество дистиллированной воды. Эмульсия изготовляется не более чем на 24 *ч*, чтобы избежать образования в ней осадка.

Компрессор необходимо регулярно чистить от отложений эмульсии в цилиндрах, клапанах, холодильниках, коммуникациях и арматуре, промывая их горячей водой или продувая паром.

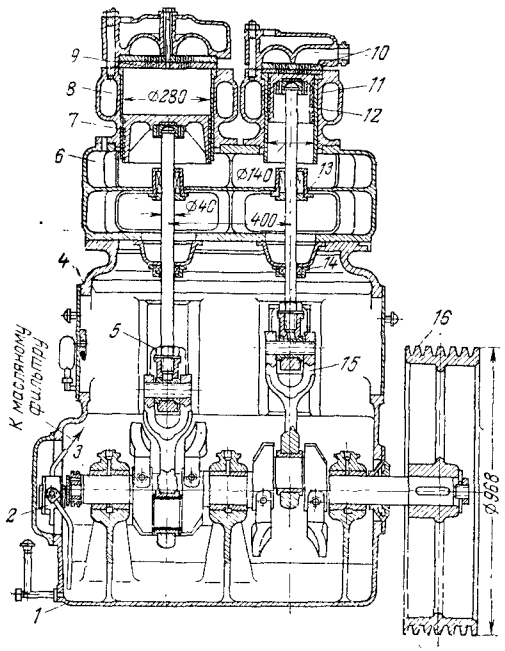



Рис. 10.12. Компрессор КПК-6:

*1* — картер; *2* — масляный насос; *3* — коленчатый вал; *4* — станина; *5* — крейцкопф; *6* — средник (фонарь) с сальниками; *7* — поршень I ступени; *8* — цилиндр I ступени; *9* — клапан I ступени; *10* — клапан II ступени; *11* — цилиндр II ступени; *12* — поршень II ступени; *13* — газовый сальник; *14* — сальник маслослизывающий; *15* — шатун; *16* — маховик.

Кислородные компрессоры с графитовыми кольцами. Применение водноглицериновой или эмульсионной смазки приводит к увлажнению сжатого кислорода и необходимости его последующей осушки при транспортировании по наземному кислородопроводу. Поэтому для получения сухого сжатого кислорода разработаны и применяются компрессоры с поршневыми кольцами из графита, работающими без смазки.

При трении по металлу от кристаллов графита отщепляется множество мелких чешуек, покрывающих поверхность трения тонкой графитовой пленкой. В процессе приработки графитная пленка уплотняется, коэффициент трения снижается и, достигнув определенной минимальной величины, остается постоянным.

Поршневые кольца из графита целесообразно применять также в воздушных компрессорах среднего и низкого давления, подающих воздух в блок разделения (см. гл. 14). Поршневые уплотнения из графита достаточно широко применяются в компрессорах и вакуум-насосах.

В качестве примера рассмотрим особенности компрессора КПК-6, предназначенного для сжатия кислорода и выполненного в виде вертикальной двухлинейной, двухступенчатой машины простого действия (рис. 10.12). Охлаждение водяное; оба кожухотрубных холодильника расположены в верхней части рамы ограждения компрессора. Наверху расположены также два фильтра



из пористой бронзы (для очистки сжатого кислорода от графитовой пыли), устанавливаемые после каждого цилиндра перед холодильником.

Компрессор и электродвигатель смонтированы на общей раме; привод осуществляется через клиноременную подачу. Между цилиндрами и станиной расположен средник, в котором размещены газоуплотняющие (рис. 10.13, *а*) и маслослизывающие (рис. 10.13, *б*) сальники. Для уплотняющего сальника применяют графитовые

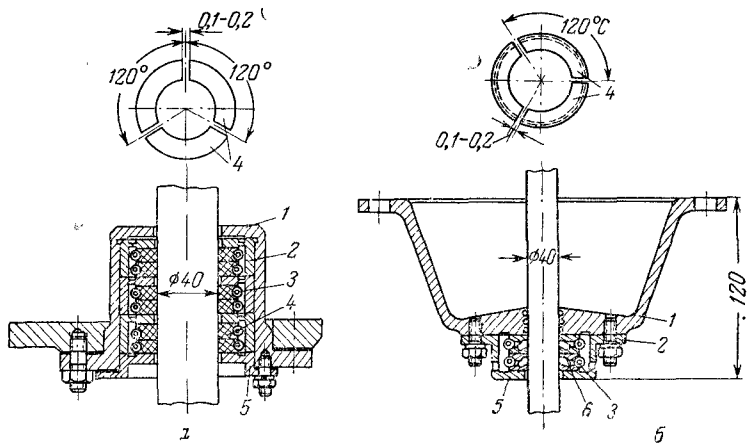



Рис. 10.13. Сальники компрессора КПК-6:

*а* — газоуплотняющий; *б* — маслослизывающий: *1* — корпус; *2* — стаканы; *3* — браслетные пружины; *4* — уплотняющие графитовые кольца; *5* — крышка сальника; *6* — бронзовые кольца.

кольца из трех сегментов; кольца *4* попарно закладывают в бронзовые стаканы *2* и стягивают браслетными пружинами *3*. Стаканы с кольцами устанавливают в корпус *1* и закрепляют крышкой *5*.

Маслослизывающий сальник снабжен двумя кольцами *4* из бронзы Бр. ОЦС6-6-3; кольца разрезаны на три части и стягиваются браслетными пружинами *3*. Такая конструкция препятствует попаданию в средник и цилиндр пленки масла, поднимающейся по штоку вверх. Кислород, просочившийся через поршневые кольца и газовый сальник в средник, отводится во всасывающую трубу.

Цилиндры компрессора литые, чугунные, снабжены водяной охлаждающей рубашкой; головки цилиндров также имеют охлаждающую рубашку. Внутрь цилиндров запрессованы рабочие втулки из латуни ЛК-80-3Л, внутренняя поверхность которых хромирована, а затем подвергнута тщательной шлифовке и полировке. Чистота поверхности втулки должна быть не ниже ▽8. С такой же чистотой обрабатывается и поверхность штоков из стали 3Х13; они подвергаются поверхностной закалке с последующей полировкой. Это вызывается тем, что графитовые кольца меньше

всего изнашиваются при работе в паре с твердыми, хорошо полированными поверхностями. Втулку второй ступени можно делать из стали 1Х18Н9Т. Клапаны компрессора изготовляют из латуни

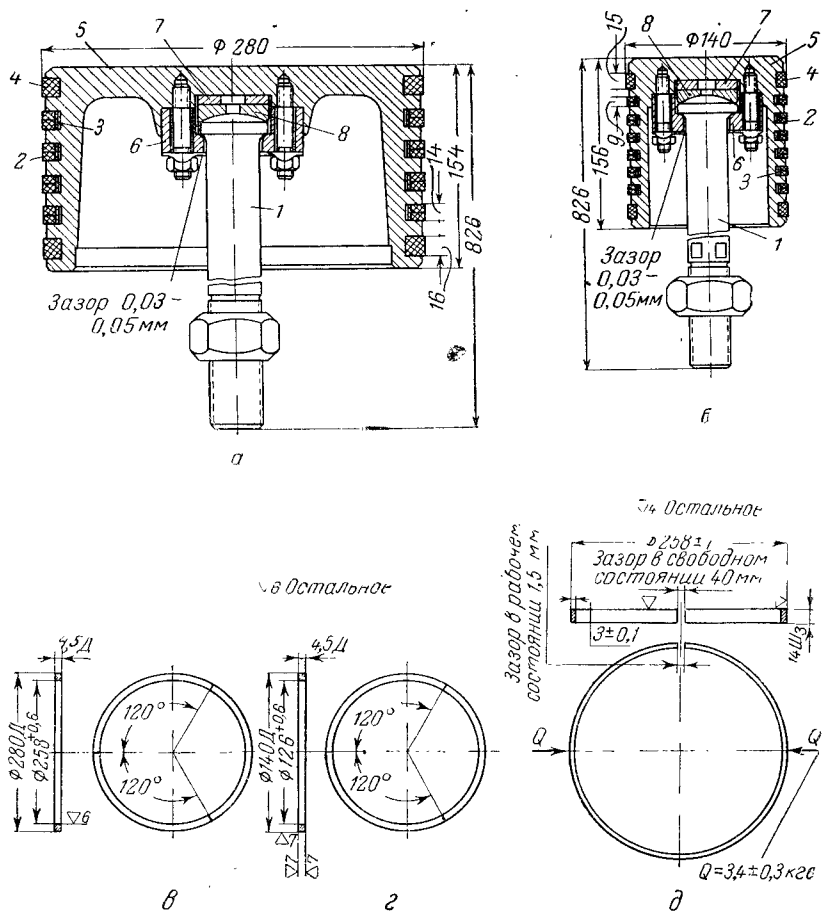



Рис. 10.14. Поршни и поршневые кольца компрессора КПК-6:
поршни: *а* — I ступени; *б* — II ступени; поршневые кольца; *в* — I ступени; *г* — II ступени; *д* — экспандерные; *1* — шток; *2* — графитовые (двойные) уплотняющие кольца; *3* — разжимающие кольца; *4* — графитовые направляющие (одинарные) кольца; *5* — поршень; *6* — крышка; *7* — подкладная шайба; *8* — пята.

ЛЖМц-59-1-1, полосовые, самопружинящие, с пластинками из бериллиевой бронзы.

Поршни I и II ступеней (рис. 10.14, *а* и *б*) отлиты из латуни ЛК-80-3Л. По концам поршней установлены направляющие кольца (одинарные), а в средней части — уплотняющие (двойные). Каждое кольцо (рис. 10.14, *в*, *г* и *д*) состоит из трех сегментов. По



графитовыми уплотняющими кольцами расположено стальное разжимающее (экспандерное) кольцо. Число колец в поршне в $1^1/_2$—2 раза больше, чем в поршнях с металлическими кольцами смазываемыми маслом.

Из графитовых материалов для работы без смазки в кислородных поршневых компрессорах пригодны следующие:

| Марка графита | Прочность на сжатие, *кгс/см²* | Предельное избыточное давление сжатия кислорода в цилиндре, *кгс/см²* |
|---|---|---|
| 2П-1000 | 1675 | 30—50 |
| Д | 1500—1800 | 7—10 |
| Е | 800—1000 | 7—10 |

Срок службы колец зависит от давления сжатия: при избыточном давлении сжатия до 7 *кгс/см²* кольца могут служить даже 10 000—12 000 *ч*; при давлениях свыше 60 *кгс/см²* срок службы снижается до 1000—2000 *ч*. Небольшая влажность сжимаемого газа существенно уменьшает износ графитовых колец.

В компрессоре КПК-6 кольца выполнены из графита марки 2П-1000*. При конечном избыточном давлении сжатия 15 *кгс/см²* кольца могут служить 4000—6000 *ч*, при 30 *кгс/см²* — 2500—3000 *ч*. Замена колец производится после их износа более чем на 20%.

При применении графитовых колец цилиндры и штоки компрессоров должны быть шлифованными; необходимо строго соблюдать соосность поршней и цилиндров при сборке. Неточности изготовления и сборки сильно сказываются на сроке службы колец.

**Обслуживание и ремонт кислородных компрессоров.** Перед пуском компрессора следует проверить надежность всех креплений, исправность привода, уровень смазочного масла в картере, количество дистиллированной воды или эмульсии в бачке для смазки цилиндров и наличие газа в газгольдере. Необходимо убрать все посторонние предметы, протереть компрессор и площадку около него. После этого открывают продувочный вентиль водоотделителя, вентиль на всасывающем трубопроводе из газгольдера и кран охлаждающей воды, а вентили на всасывающей воздушной трубе закрывают. Затем поворачивают от руки маховик компрессора на 1—2 оборота, чтобы убедиться в отсутствии помех ходу поршня.

Закончив подготовку, предупреждают наполнительное отделение о пуске компрессора; затем открывают краник бачка с дистиллированной водой, регулируют подачу воды и включают электродвигатель.

Когда маховик компрессора начнет вращаться с нормальной скоростью, открывают запорный вентиль на нагнетательной трубе. Затем проверяют, как работают масляный насос, механизмы дви-

* Графит марки 2П-1000 имеет высокую твердость и трудно обрабатывается. Поэтому для давления сжатия менее 10 *кгс/см²* можно применять более дешевые и менее хрупкие, но менее стойкие графиты марок Д и Е.

жения и устройства, подающие дистиллированную воду или эмульсию в цилиндры; проверяют герметичность маслопроводов, работу смазочной системы и устройств, подающих охлаждающую воду в ванну холодильников; убеждаются в отсутствии стуков в шатунно-кривошипном механизме и цилиндрах компрессора.

Если включаемый компрессор должен работать одновременно с несколькими другими на общую сеть, необходимо вначале уравнять давление в последней его ступени с давлением в сети и только после этого открыть запорный вентиль высокого давления на нагнетательной трубе компрессора, включаемого в сеть.

Во время работы компрессора необходимо тщательно следить за действием смазочной системы, своевременно добавлять масло в картер для смазки механизма движения, дистиллированную воду и эмульсию для смазки цилиндров компрессора, а также следить за распределением давлений в ступенях компрессора.

Предохранительные клапаны компрессоров следует продувать не реже одного раза в смену, а водоотделитель компрессора — каждые 15—20 *мин* (если нет автоматической продувки).

Ремонт деталей и узлов кислородных компрессоров производят так же, как и ремонт соответствующих деталей воздушных компрессоров. Особое внимание должно быть обращено на тщательное обезжиривание всех деталей компрессора, соприкасающихся с кислородом, и хранение их в условиях, исключающих возможность попадания на детали следов масла или жиросодержащих веществ.

Расточка цилиндра или втулки допускается в том случае, если площадь поперечного сечения цилиндра при этом увеличится не более чем на 10%. В противном случае втулку или цилиндр следует заменить новыми. Поршень цилиндра, подвергшегося расточке, должен быть заменен новым в том случае, если зазор между стенкой цилиндра и поршнем превышает толщину манжеты.

При монтаже коленчатого вала необходимо обеспечить одновременное прилегание всех шеек вала к вкладышам коренных подшипников. Площадь соприкосновения баббита с валом после окончательной шабровки поверхностей вкладышей должна быть не менее 3—4 пятен на 1 *см*$^2$ (или 20—25 пятен на 1 *кв.* дюйм). Такая же степень прилегания должна быть достигнута после пришабривания вкладышей к мотылевым шейкам вала. Коленчатый вал и вал привода должны быть выверены на соосность; допускается несоосность валов не более 0,05 *мм*.

Компрессор следует установить строго по вертикали; допускаемое отклонение — не более 0,15 *мм* на 1 *м*.

Наиболее частым видом ремонта кислородных компрессоров является смена фибровых манжет поршней; обычно это производят при очередной остановке аппарата на отогревание.

Стойкость манжет зависит от качества фибры, качества изготовления манжет, состояния рабочей поверхности цилиндра и смазки.



Продолжительность работы фибровых манжет в цилиндрах различных ступеней компрессора неодинакова и составляет (в месяцах):

| | I ступень | II ступень | III ступень |
|---|---|---|---|
| Фибра хорошего качества . . . . . | До 18 | 3—4 | 1 |
| Фибра среднего качества . . . . . | 7—8 | 0,5—1,5 | 0,4—0,5 |

Манжеты следует изготовлять из фибры марки ФПК (ГОСТ 14613—69). В фибре не должно быть посторонних твердых включений, вызывающих преждевременный износ цилиндров. Фибру нарезают квадратами требуемого размера и замачивают в воде при 60—70 °С в течение 8—10 *ч*. Затем из квадратов вырезают диски, диаметр которых подбирают или рассчитывают по размеру поршня. Диски прессуют в штампе, снабженном складкодержателем, и сушат или в штампе или в специальном стакане, диаметр которого равен диаметру манжет. При штамповке диаметр пуансона должен быть меньше диаметра матрицы на величину, равную тройной толщине размоченной фибры.

Высушенные манжеты обрезают на токарном станке, снимают на кромке фаску под углом 45°, а затем вырезают центральное отверстие, соответствующее размерам поршня. Наружную (боковую) рабочую поверхность манжеты шлифуют шкуркой, а затем полируют фетром. Готовые манжеты набирают на деревянные оправки, стягивают болтом и помещают для хранения в закрытые металлические чехлы — трубки из жести или латуни.

Перед установкой манжеты размягчают в горячей воде, ставят на поршень, затягивают гайки поршня, а поверх манжет надевают хомуты из листовой стали толщиной 1—1,5 *мм*, предохраняющие кромки манжет от коробления. Перед установкой поршней в цилиндр хомуты снимают и осторожно (чтобы не повредить манжет) вводят в цилиндр поршни. После этого соединяют штоки с крейцкопфами.

Зазоры между поршнями и крышками должны быть в пределах 8±0,5 *мм*; регулируют зазоры с помощью гаек в корпусе крейцкопфа. Допустимая величина перебега манжет за край зеркала втулки лежит в пределах 0—2 *мм*.

Для изготовления манжет сальников кожу предварительно обезжиривают промывкой в 10-кратном количестве дихлорэтана или четыреххлористого углерода в течение 24 *ч* при комнатной температуре, с двукратной сменой растворителя. Затем кожу сушат на воздухе и пропитывают расплавленным парафином (при 75 °С) или церезином (при 95 °С) в течение 3 *мин*, после пропитки избыток парафина удаляют. Манжеты из обработанной таким способом кожи штампуют при 80—85 °С, охлаждая их вместе со штампом; при штамповке лицевая сторона кожи должна быть обращена внутрь. Готовая манжета не должна иметь складок и повреждений на рабочей поверхности.

Холодильники после монтажа и ремонта подвергают гидравлическим испытаниям на следующие избыточные давления: I ступе-

ни 7,5 *кгс/см*²; II ступени 46 *кгс/см*²; III ступени 250 *кгс/см*². Предохранительные клапаны регулируют на давление 6 *кгс/см*² для I ступени; 33 *кгс/см*² для II ступени и 180 *кгс/см*² для III ступени, после чего пломбируют.

В случае применения эмульсионной смазки необходимо при очередном осмотре компрессора тщательно очищать цилиндры, клапаны, холодильники и другие узлы от твердых осадков эмульсии; не реже одного раза в год очищать весь нагнетательный кислородопровод от осадков эмульсии, для чего продувают трубопровод паром, который хорошо удаляет эти осадки. Значительные отложения эмульсии, если их своевременно не удалить, могут послужить причиной забивки клапанов компрессора и труб кислородопровода.

Присутствие в мыле свободных неомыленных жиров может создать опасность взрыва в компрессоре. Высказывались также предположения, что даже при отсутствии жиров само мыло может стать причиной вспышки в коммуникациях кислородного компрессора, если эти коммуникации изготовлены из меди и длительное время не очищались от отложений мыльной эмульсии, поскольку медь может являться катализатором и способствовать разложению мыла на углеводороды, которые в определенных условиях дают вспышку в среде сжатого кислорода. Однако специальные исследования, поставленные для изучения взаимодействия эмульсионной смазки и продуктов ее разложения с кислородом при ударной нагрузке до 150 *кгс/см*², показали, что эти вещества при указанных условиях кислородостойки.

## 10.4. НАСОСЫ ДЛЯ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

Перекачивание сжиженных газов: кислорода, азота, аргона, обогащенного воздуха производится насосами. В зависимости от количества перекачиваемой жидкости и конечного давления применяются поршневые (плунжерные) насосы и центробежные. В цехах разделения воздуха насосы для сжиженных газов используются для подачи:

жидкого кислорода, азота и аргона в теплообменник, где жидкость превращается в газ под избыточным давлением до 165—240 *кгс/см*² для заполнения баллонов (поршневые);

жидкого кислорода и азота в испарители газификационных установок стационарного и транспортного типа, где жидкость превращается в газ под избыточным давлением 40—420 *кгс/см*², перепускаемый в баллоны или хранилища (реципиенты) высокого давления (поршневые);

сжиженного газа из одного резервуара в другой (поршневые и центробежные).

Насосы выпускаются с горизонтальным и вертикальным расположением поршня. В отдельных случаях используются насосы с наклонным поршнем. В зависимости от условий работы применяются насосы для перекачивания переохлажденной жидкости (в установках для разделения воздуха) или непереохлажденной жидкости (в стационарных и передвижных установках для газификации жидкого кислорода и азота).



Ниже приводится описание некоторых типов поршневых насосов для сжиженных газов*.

**Конструкция насосов.** На рис. 10.15 показана цилиндровая группа (с сальниковым уплотнением плунжера) насоса для газификации и нагнетания кислорода в баллоны.

Всасывающий *1* и нагнетательный *2* беспружинные шариковые клапаны из нержавеющей стали 1Х18Н9 или ЭИ-229 расположены в головке *3* насоса, изготовляемой из латуни марки ЛС-59-1; седла клапанов выполнены из латуни ЛЖМц-59-1-1, а плунжер *8* — из нержавеющей стали 1Х18Н9.

Плунжеры должны быть достаточно большой длины для уменьшения холодопотерь вследствие теплопроводности. Втулка *4* цилиндра выполнена из латуни ЛС 59-1. Плунжер не касается стенок цилиндра, а движется в направляющих графитовых втулках *17* и *20* из графита марок М20 или 15Е-С (со свинцом), обладающими хорошими антифрикционными свойствами. Для уплотнения плунжера на холодном конце служит сальник, состоящий из грундбуксы *5* и колец *6* и *7*. Кольца *6* спрессованы из нитевидного прографиченного свинца или из прографиченного асбеста, а кольца *7* — из чешуйчатого графита ТГ (ГОСТ 4596—49*) и предназначены для смазки сальника.

Сальник холодного конца зажимается гайкой *14* через промежуточные втулки *9*, *13* и фонарь *19*. Холодная (на рисунке правая) часть насоса отделена от теплой (левой) текстолитовой малотеплопроводной проставкой *12*. На теплом конце плунжера имеется сальник с набивкой *15* из прографиченного свинца или прографиченного асбеста. Сальник затягивается нажимной гайкой *16*.

Газообразный кислород, просачивающийся через неплотности сальника, отводится наружу по трубке *11*. Для предупреждения обмерзания сальник теплого конца непрерывно обдувается сухим азотом.

Кожух цилиндра насоса помещен в изоляции воздухоразделительного аппарата (на рисунке насос показан без изоляции). Привод насоса осуществляется через червячный редуктор от электродвигателя. Кривошип коленчатого вала соединен с шатуном, двигающим плунжер насоса.

В зависимости от режима работы кислородного аппарата производительность насоса должна изменяться для увеличения или уменьшения количества отбираемого кислорода. Регулировать производительность насоса можно изменением числа оборотов вала, вследствие чего изменяется число ходов плунжера. Если насос работает с электродвигателем постоянного тока, число оборотов регулируют с помощью реостата. При работе с электродвигателем переменного тока с постоянным числом оборотов для регулирования производительности насоса используется кулисный механизм,

* Ю. А. Мирославская, И. И. Гильман, Труды ВНИИкимаш., вып. 7, 1963.

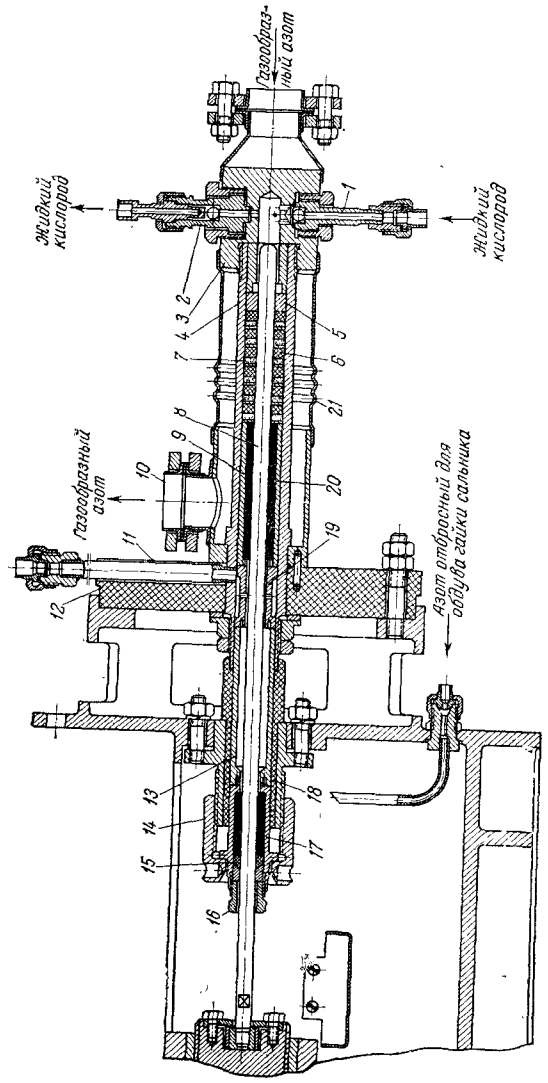



Рис. 10.15. Цилиндровая группа насоса для жидкого кислорода:

*1* — всасывающий клапан; *2* — нагнетательный клапан; *3* — головка насоса; *4* — цилиндр; *5* — грундбукса; *6* — кольца из нитевидного графитированного свинца; *7* — чешуйчатый графит; *8* — плунжер; *9*, *13* — промежуточные втулки; *10* — труба для отвода азота; *11* — трубка для отвода газообразного кислорода; *12* — текстолитовая проставка; *14* — нажимная гайка холодного сальника; *15* — асбесто-графитовая или свинцово-графитовая набивка теплого сальника; *16* — нажимная гайка теплого сальника; *17*, *20* — направляющие графитовые втулки; *18* — текстолитовая втулка; *19* — промежуточный фонарь; *21* — охлаждающая рубашка насоса.

который изменяет радиус кривошипа. Тем самым изменяется величина хода плунжера насоса, вследствие чего будет соответственно меняться и производительность насоса.

Привод насоса от электродвигателя переменного тока показан на рис. 10.16. Электродвигатель *8* через червячный редуктор *3* вращает кривошип *2*, который через шатун *4* шарнирно соединен с направляющими планками *6*. Планки могут качаться на оси вилки *10*, имеющей неподвижный шарнир *11*. При своем качании планки передают движение через ползушку *7* крейцкопфу *9*, который перемещается в направляющих *12*; крейцкопф соединен с плунжером *13* насоса. С помощью маховичка *5* направляющие планки

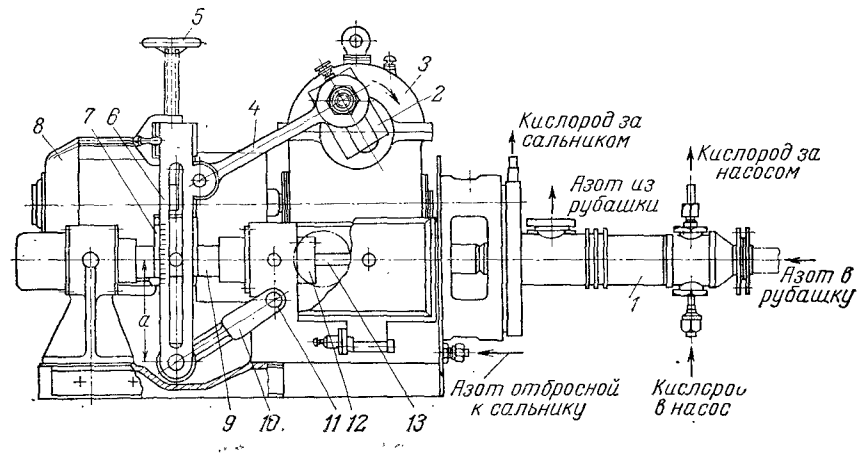



Рис. 10.16. Привод насоса:

*1* — насос; *2* — кривошип; *3* — редуктор; *4* — шатун; *5* — маховичок; *6* — направляющие планки; *7* — ползушка; *8* — электродвигатель; *9* — крейцкопф; *10* — вилка; *11* — неподвижный шарнир; *12* — направляющие; *13* — плунжер.

во время работы насоса можно перемещать вверх и вниз по шипам ползушки *7* и за счет перемены длины плеча *a* изменять величину хода плунжера, а следовательно, производительность насоса. При поднятии планок вверх плечо *a* уменьшается, ход плунжера сокращается и производительность насоса снижается.

Неполадки в работе насоса, обычно выражающиеся в понижении его производительности, возникают вследствие пропуска в сальнике плунжера, неисправности клапанов, недостаточного охлаждения насоса азотом, забивки трубопровода на линии всасывания и т. д. Иногда наблюдается сильное нагревание муфты сальника, вызываемое перекосом сопряженных деталей насоса, односторонним износом графитовой втулки, трением плунжера о втулку сальника. Для устранения дефектов приходится разбирать насос.

Графитовые и асбесто-графитовые кольца изготовляют прессованием. Заготовки сплетают из 10—20 нитей шнурового асбеста диаметром 2—3 *мм*, посыпанных предварительно чешуйчатым гра-

фитом. Диаметр сплетенного шнура должен на 2—3 *мм* превышать радиальный зазор между плунжером и цилиндром. Торцы колец перед закладкой в штамп срезают под углом 45° к плоскости кольца. Диаметры готовых колец должны быть равны диаметрам плунжера и цилиндра.

В графитовые кольца закладывают для прочности асбестовые или свинцовые нити. Набивку сальника производят после вставки в насос втулки и плунжера. Кольца проталкивают внутрь с помощью отрезка медной или латунной трубы, на конце которой имеется втулка. Внутренний и наружный диаметры втулки на 0,5 *мм* отличаются от диаметров плунжера и цилиндра, благодаря чему создаются необходимые зазоры для свободного перемещения втулки при набивке сальника.

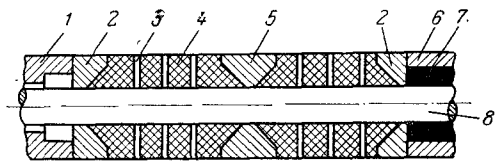



Рис. 10.17. Сборка сальника насоса по способу П. А. Костенко:

*1* — втулка; *2* — односторонние грундбуксы; *3* — чешуйчатый графит; *4* — уплотняющее асбесто-графитовое кольцо; *5* — двусторонняя грундбукса; *6* — промежуточная втулка; *7* — направляющая графитовая втулка; *8* — плунжер.

Используется следующий способ изготовления уплотняющих асбестовых колец (предложен П. А. Костенко). Чешуйчатый графит засыпают в дистиллированную воду и замешивают до густоты жидкой кашицы. В смесь погружают шнуровой асбест, без оплетки, тщательно обволакивают его водно-графитовой смесью и наматывают на пуансон прессформы, которую зажимают в тиски; при этом часть воды отжимается. Затем кольца сушат до полного удаления влаги, после чего снова прессуют в прессформе. При сборке сальника с такими кольцами вместо двух концевых латунных колец ставят односторонние латунные грундбуксы, а в середине сальника — одну двустороннюю (рис. 10.17). Набитый таким образом сальник работает в течение 2 месяцев без смены колец.

Применяемый чешуйчатый графит должен иметь зольность не более 13%; содержание хлопчатобумажных нитей в асбесте не должно превышать 5%. Пографичивание асбеста для сальников следует производить в воде, нагретой до температуры кипения.

Основной причиной, затрудняющей работу насосов для сжиженных газов, является вскипание и испарение жидкости при поступлении ее в цилиндр насоса через всасывающий клапан. Это уменьшает степень заполнения жидкостью цилиндра насоса и резко снижает его производительность. Для предупреждения данного явления жидкость переохлаждают (при давлении подачи в насос) на 6—10 *град* или подают ее к клапану насоса под избыточным давлением 4—5 *кгс/см*². В последнем случае фактическая температура жидкости будет ниже точки кипения при давлении подачи, и вскипание жидкости при поступлении в цилиндр насоса не про-



изойдет. Переохлаждение жидкости в насосах, работающих в комплекте воздухоразделительного аппарата, производится азотом, отходящим из верхней колонны. Подача жидкости под давлением применяется в насосах для жидкого азота и кислородных насосах газификационных установок.

В насосах для перекачивания жидкого аргона и жидкого азота поршень уплотняют тремя манжетами, штампованными из обезжиренной сыромятной кожи, пропитанной парафином. Это обусловлено тем, что в среде жидкого аргона или азота, где отсутствует кислород, графит теряет свои антифрикционные свойства. Для жидких аргона и азота лучше применять насосы со щелевым уплотнением поршня (см. ниже).

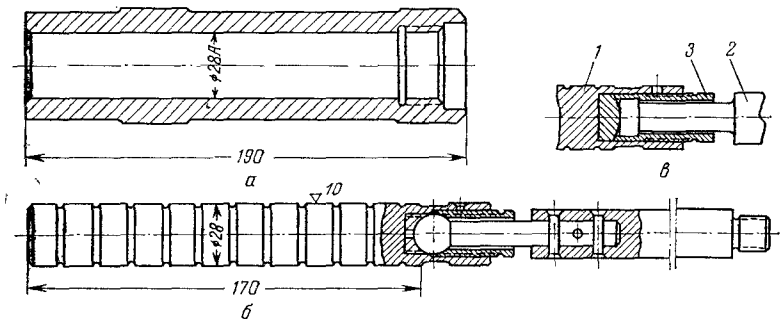



Рис. 10.18. Втулка и плунжер насоса со щелевым уплотнением:

*а* — втулка; *б* — плунжер, соединенный со штоком шаровой головкой; *в* — плунжер, соединенный со штоком плоской головкой; *1* — плунжер; *2* — шток; *3* — разрезная гайка.

Направляющие и седла всасывающего и нагнетательного клапана насосов целесообразно делать съемными для облегчения их ремонта и замены.

Более надежно работают насосы со щелевым уплотнением[12], которое создается наличием незначительного зазора между плунжером и втулкой (рис. 10.18, *а* и *б*). Зазор обеспечивает герметичность, не создавая трения между втулкой и плунжером. Для одинакового теплового расширения плунжера и втулки их изготовляют из хромомолибденовой стали 38ХМЮА. Рабочие поверхности азотируют на глубину 0,4—0,5 *мм* до твердости не ниже HR92 (шкала 15*N*), которую замеряют после снятия слоя толщиной 0,04—0,06 *мм*. Внутренний диаметр втулки изготовляют по второму классу точности для отверстий, а плунжер подгоняют к втулке притиркой с диаметральным зазором 0,025—0,08 *мм* в зависимости от диаметра плунжера и рабочего давления. Для разгрузки от бокового давления жидкости и улучшения смазки ею трущихся частей на плунжере протачивают кольцевые канавки шириной 1—2 *мм*, глубиной 0,5—1 *мм*. Все острые края скругляются. Для самоцентрирования плунжера во втулке его соединяют со штоком

с помощью шарнирной шаровой головки или полушаровой головки, работающей по плоской поверхности конца штока (рис. 10.18).

По мере увеличения зазора вследствие истирания плунжерной пары в процессе эксплуатации производительность насоса падает. При уменьшении производительности до определенного предела плунжер и втулку заменяют новыми. В зависимости от давления и конструкции продолжительность работы одной пары (плунжер — втулка) составляет от 1000 до 1500 *ч* и более. Насосы со щелевым уплотнением строят до давлений 420 *кгс/см*².

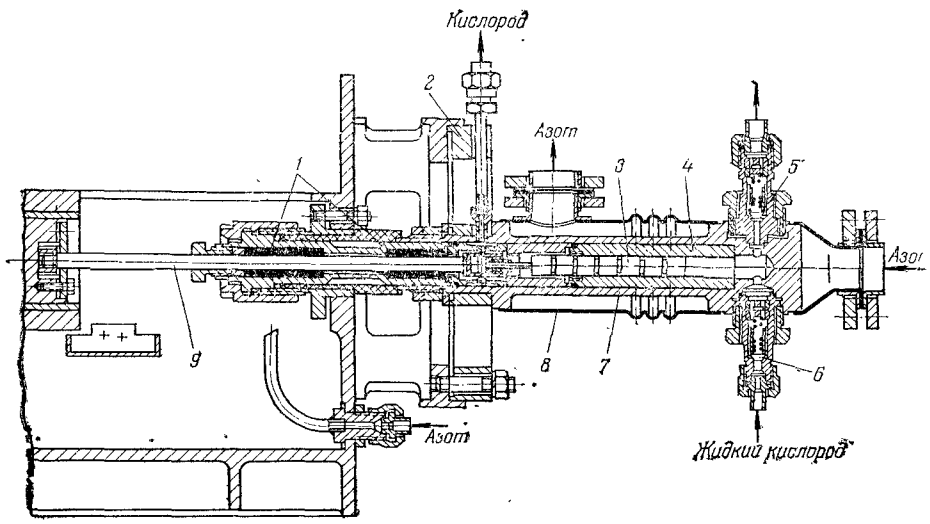



Рис. 10.19. Насос жидкого кислорода НЖК-11М со щелевым уплотнением плунжера:

*1* — графитовые направляющие втулки; *2* — теплоизолирующая плита из нержавеющей стали; *3* — плунжер; *4* — втулка цилиндра; *5* — нагнетательный клапан; *6* — всасывающий клапан; *7* — цилиндр; *8* — охлаждающая рубашка; *9* — шток.

Длина рабочей части втулки принимается $l=(5—8)D$, где $D$ — диаметр плунжера. Чем выше давление жидкости после насоса, тем больше должна быть длина щели. Производительность насоса повышают, увеличивая ход плунжера.

Насос НЖК-11М со щелевым уплотнением плунжера показан на рис. 10.19. На поверхности плунжера *3* имеются канавки с округленными кромками, образующие уплотняющий лабиринт. С штоком *9* плунжер сочленен шарнирно (плоская пята плунжера опирается на шаровую головку штока) для самоустановки плунжера во втулке цилиндра и предупреждения его перекоса. Учитывая неизбежный износ плунжера и втулки, проектная производительность насосов со щелевым уплотнением принимается на 30—40% выше минимально необходимой.



**Техническая характеристика насоса НЖК-11**

| | |
|---|---|
| Производительность, *дм³/ч* при ходе плунжера от 70 до 30 *мм* | 50±10 |
| Наибольшее избыточное давление, *кгс/см²* | 240 |
| Скорость вращения вала, *об/мин* | 90 |
| Диаметр плунжера, *мм* | 20 |
| Диаметральный зазор в щелевом уплотнении, *мм* | 0,025—0,03 |
| Описанный объем при максимальном ходе, *дм³/ч* | 100 |
| Средняя скорость поршня, *м/сек* | 0,18 |
| Электродвигатель | |
| тип | А42-4Щ₂ |
| мощность, *квт* | 2,8 |
| скорость вращения вала, *об/мин* | 1420 |
| напряжение, *в* | 220/380 |
| Вес насоса с электродвигателем, *кгс* | 160 |

Одесский завод «Автогенмаш» комплектовал установки АГСН-150 и АКГСН-960 насосом НЖК-200/230 производительностью 200 *л/ч* и давлением 230 *кгс/см*². В этом насосе кулиса отсутствует и регулировка производительности производится переустановкой кривошипного пальца, чем изменяется длина хода плунжера.

Насосы также используются в установках для газификации жидкого кислорода под избыточным давлением до 240 *кгс/см*² или жидкого азота под давлением до 420 *кгс/см*². Если при этом насосом перекачивается непереохлажденный жидкий кислород, то ухудшаются условия всасывания жидкости вследствие частичного испарения, что затрудняет работу насоса. В этих случаях применяют *двухступенчатые насосы* и *погружные насосы*.

В двухступенчатых насосах первая ступень работает под заливом и служит для подачи жидкости под давлением во вторую ступень, что исключает вскипание жидкого кислорода и обеспечивает нормальную работу клапанов насоса.

Схема газификационной установки с двухступенчатым горизонтальным кислородным насосом показана на рис. 10.20. Жидкий кислород, доставленный потребителю, сливается в стационарные резервуары *2* и *4*. Уровень жидкости и давление в резервуарах контролируются манометром и указателем уровня, которые размещены на щитах *1* и *5*. Жидкий кислород под давлением паров в резервуаре подается по трубе *9* через фильтры *3* в насос *8*.

Насос снабжен баком *13* с поплавковым клапаном *12*, поддерживающим постоянный уровень жидкости в баке. Жидкий кислород поступает самотеком через окна в стенке цилиндра в I ступень насоса, при ходе поршня *10* выталкивается в цилиндр II ступени и заполняет его. Избыток кислорода и пары по трубке *11* пропускаются обратно в бак. При обратном ходе поршня жидкий кислород через нагнетательный клапан II ступени поступает в змеевик *7* испарителя, где превращается в газ и наполняет баллоны, присоединенные к рампе *6*.

Установка может перекачивать от 65 до 85 *дм³/ч* жидкого ки лорода и наполнять (с учетом потерь) около десяти 40-литров баллонов в 1 *ч* при избыточном давлении газообразного кислоро до 150—165 *кгс/см²*. Потребляемая мощность: насосом 1,2 *кв* электроподогревателем испарителя 10,8 *квт*.

Горизонтальный двухступенчатый насос НЖК-3 (рис. 10.2 производительностью 75±10 *дм³/ч* жидкости представляет соб однолинейную плунжерную машину со щелевым лабиринтн

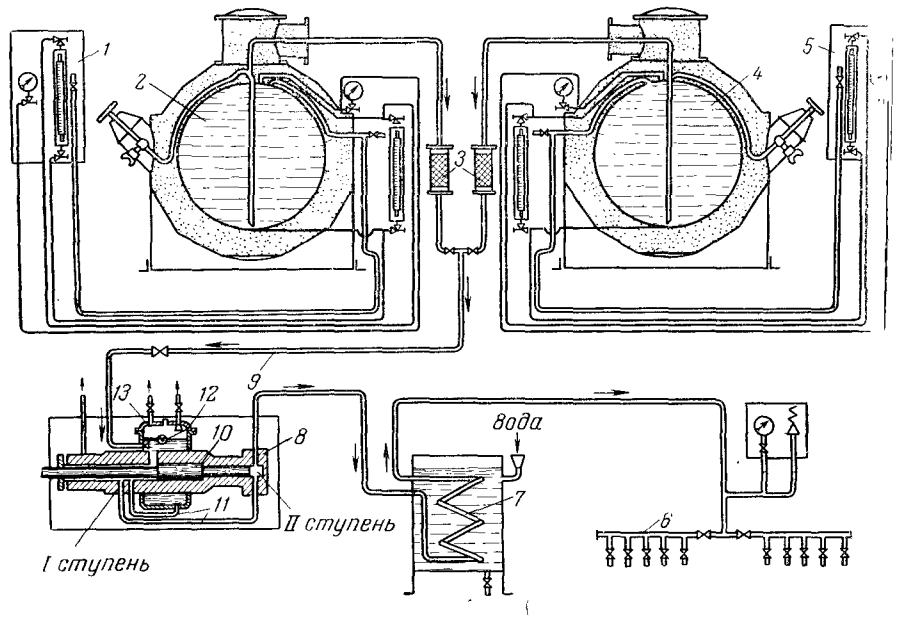



Рис. 10.20. Схема газификационной установки с двухступенчатым кислород насосом:

*1, 5* — щиты; *2, 4* — резервуары жидкого кислорода; *3* — фильтры; *6* — наполнител рампа; *7* — змеевик; *8* — насос; *9* — труба; *10* — поршень; *11* — трубки; *12* — попла вый клапан; *13* — бак.

уплотнением. Зазор между плунжером *5* и втулкой *3* равен: в линдре I ступени 0,09—0,12 *мм*; в цилиндре II ступени 0,03 0,045 *мм*. Плунжер и втулка изготовлены из азотированной х момолибденовой стали, шток — из нержавеющей хромоникеле стали марки 1Х18Н9. Диаметр плунжера I ст. 32 *мм*, II с 20 *мм*. Ход — 70 *мм*. Число ходов — 90 в *мин*.

В качестве направляющих для штока используются вту из графита 15Е, пропитанного свинцом (до 30%). Холодный ко штока уплотнен сальником *9* из асбесто-графитовых колец пр прографиченного нитевидного свинца. Нити свинца должны им длину не менее 10 *мм* и сечение 0,12—0,22 *мм²*. Сальник с упл



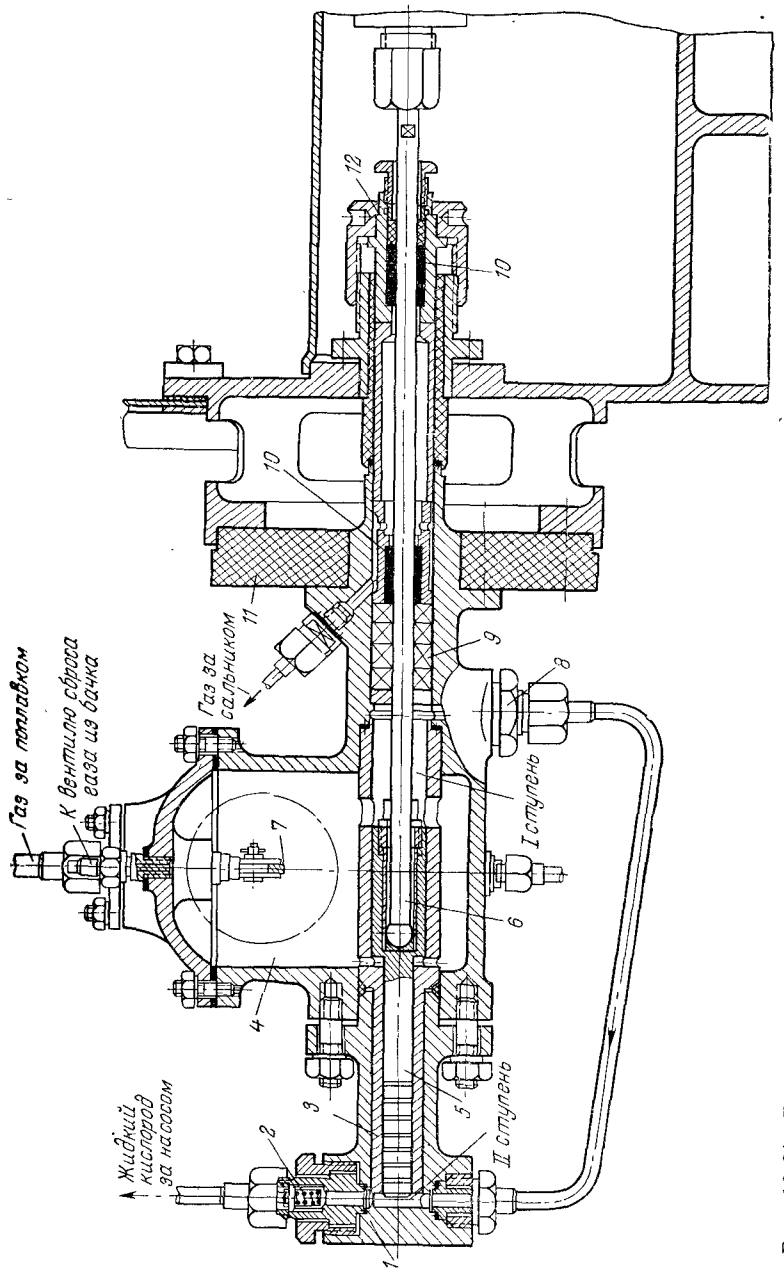



Рис. 10.21. Горизонтальный двухступенчатый насос НЖК-3 для непереохлажденного жидкого кислорода:

*1* — головка насоса; *2* — нагнетательный клапан II ступени; *3* — втулка; *4* — бачок для жидкого кислорода; *5* — плунжер; *6* — шток; *7* — поплавковый клапан; *8* — нагнетательный клапан I ступени; *9* — асбестографитовый (холодный) сальник; *10* — графитовые втулки; *11* — текстолитовая проставка; *12* — асбестовый (теплый) сальник.

нительными кольцами из нитевидного свинца работает без смены 1000—1200 *ч*.

При работе насоса допускается пропуск через сальник до 1 $м^3/ч$ кислорода. Просачивающийся через сальник кислород отводится по трубке в атмосферу. Наружный конец штока *6* уплотнен асбестовым сальником *12*, препятствующим выходу кислорода

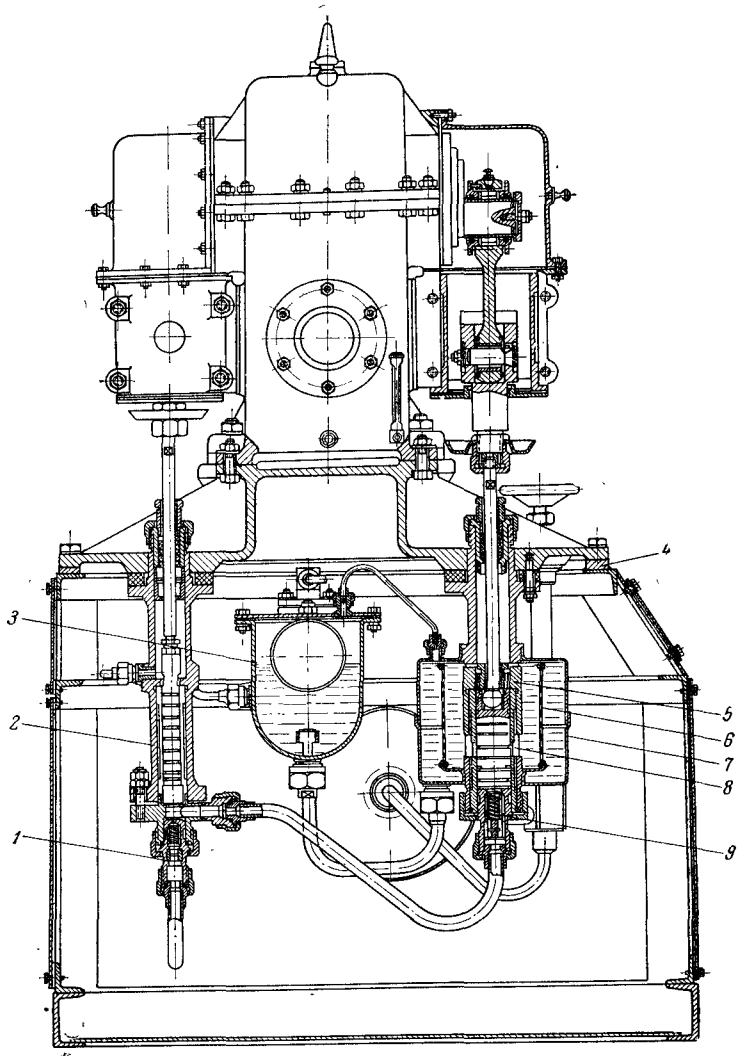



Рис. 10.22. Плунжерный вертикальный насос НЖК-1М для непереохлажденной жидкости:

*1* — нагнетательный клапан II ступени; *2* — цилиндр II ступени; *3* — бачок поплавкового клапана; *4* — текстолитовая плита; *5* — цилиндр I ступени; *6* — сетчатый фильтр; *7* — ру башка цилиндра I ступени; *8* — заливочные окна; *9* — нагнетательный клапан I ступени



к шатунно-кривошипному механизму насоса и подсосу влажного воздуха в насос при его остановке. Во время сборки насоса необходимо следить за тем, чтобы плунжер и втулка были чистыми и на их поверхности не было следов влаги. При эксплуатации следить за состоянием и работой фильтров для жидкого кислорода, установленных перед насосом (для очистки жидкости от частиц льда, твердой двуокиси углерода, металла и др.).

Для газификационных установок предназначены вертикальные двухлинейные двухступенчатые насосы НЖК-1М (рис. 10.22) для работы при избыточном давлении нагнетания до 240 $кгс/см^2$, производительностью 170—250 $дм^3/ч$ жидкого кислорода. Насос имеет два вертикальных цилиндра: цилиндр *5* (I ступени) и цилиндр *2* (II ступени). Жидкий кислород в цилиндр I ступени поступает самотеком из бачка *3* с поплавковым клапаном. Привод насоса осуществляется от электродвигателя через редуктор. Насос помещен в кожух с тепловой изоляцией. Конструкции уплотнений плунжеров и сальников в насосе НЖК-1М аналогичны принятым в насосе НЖК-3.

Погружные насосы применяют для перекачивания жидкости из транспортных резервуаров и газификации; их устанавливают или непосредственно на транспортном резервуаре или в отдельной стационарной цистерне, соединенной с транспортным резервуаром трубопроводами для жидкости и газа. На рис. 10.23 показана установка погружного насоса НЖА-34М на транспортном резервуаре ТРЖК-7М емкостью 2000 *кг* жидкого $O_2$.

Необходимое переохлаждение перекачиваемой жидкости при использовании погружных насосов достигается в результате повышения давления в сосуде до избыточного давления 1,5—3 $кгс/см^2$ (0,15—0,3 $Мн/м^2$); например, при давлении 2,5 $кгс/см^2$ переохлаждение составляет 13 *град* для жидкого кислорода и 12 *град* для жидкого азота.

Целесообразность применения погружных насосов объясняется тем, что на охлаждение цилиндровой группы не требуется дополнительного времени, поскольку она все время погружена в жидкость. Благодаря этому насос запускается сразу.

Технические данные серийных насосов приведены в табл. 10.2.

Новые насосы ВНИИкриогенмаш для сжиженных газов имеют щелевое уплотнение поршня в цилиндре с малым зазором между рабочими поверхностями. Цилиндр и поршень изготовлены из стали 38ХМЮА с последующим азотированием рабочих поверхностей, что обеспечивает долговечность пары в пределах 1000—1200 *ч* работы под давлением.

В новых насосах уплотнение штока фторопластовое, а направляющая втулка крейцкопфа сделана из металлокерамики. Уменьшена мощность электродвигателя, применена более совершенная конструкция узла регулирования производительности, снижен вес и увеличен механический к. п. д. насоса. Гарантийный срок службы насоса увеличен с 5000 до 6000 *ч*. Технические данные, характери-

зующие новые насосы для сжиженных газов (конструкции ВНИИкриогенмаш), приводятся ниже:

| | 11 НСГ 60/400 | 12 НСГ* 300/400 | 12 НСГ** 500/200 | 22 НСГ*** 130/400 | 22 НСГ**** 500/200П |
|---|---|---|---|---|---|
| Производительность, *дм³/ч* | 60 | 300 | 500 | 130 | 500 |
| Давление максимальное, *кгс/см²* | 420 | 420 | 220 | 420 | 210 |
| Диаметр плунжерной пары, *мм* | 15 | 20 | 25 | 20 | 25 |
| Ход, *мм* | 20—68 | 20—130 | | 20—64 | 20—130 |
| Число двойных ходов в 1 *мин* | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Мощность электродвигателя, *квт* | 4 | 10 | 10 | 7,5 | 14 |
| Назначение насоса и его исполнение | Погружные, вертикальные | | | Для блоков разделения воздуха Горизонтальные | Для блоков БР-1, КтА-33, и др. |

* Взамен НЖА-34М. ** Взамен НЖК-29М. *** Взамен НЖА-22М. **** Взамен НЖК—19.

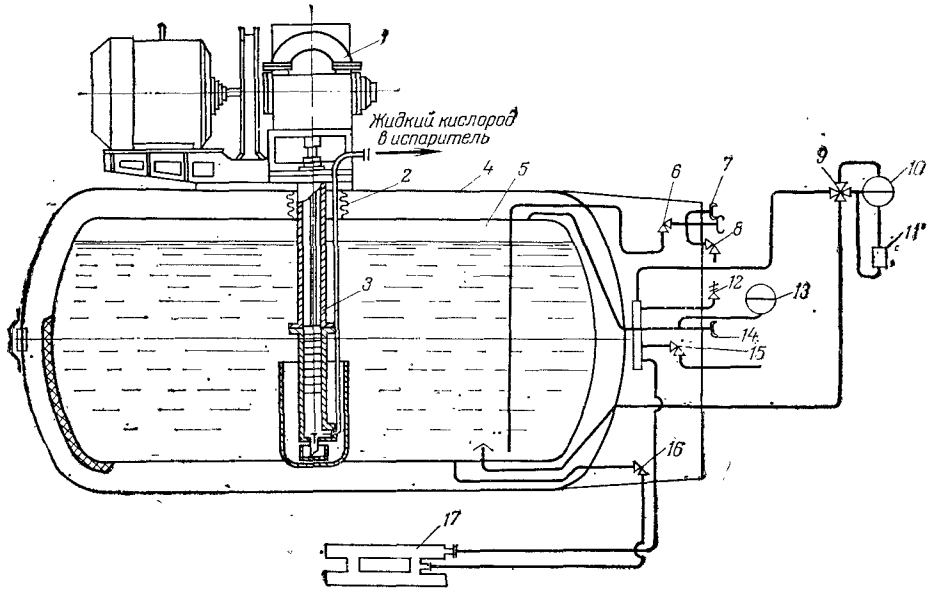



Рис. 10.23. Схема установки погружного насоса на транспортном резервуаре ТРЖК-7М емкостью 2000 *кг* жидкого кислорода:

*1* — механизм привода насоса; *2* — сильфонная горловина; *3* — цилиндровая группа насоса; *4* — наружный резервуар емкости; *5* — внутренний резервуар емкости; *6* — вентиль наполнения; *7* — предохранительная разрывная мембрана; *8* — вентиль сброса давления из шланга; *9* — трехходовой вентиль; *10* — указатель уровня жидкости; *11* — баллон-компенсатор; *12* — предохранительный клапан; *13* — манометр; *14* — предохранительная мембрана; *15* — вентиль спуска давления из резервуара; *16* — вентиль подъема давления в резервуаре; *17* — испаритель.



**Таблица 10.2. Насосы для газификации и ус**

| Индекс | Давление, *кгс/см²* | Производительность, *л/ч* | Электродвигатель: тип | мощность, *квт* | число оборотов в 1 *мин* | Длина, ширина, высота, *мм* | Вес, *кгс* | Конструктивные данные: Число двойных ходов в 1 *мин* | Диаметр плунжера, *мм*: I ст. | II ст. | Ход, *мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| НЖК-1М* | 240 | 250±20** | А052-4Ш₂ | 7** | 1440** | 1030 | 780 | 185** | 45 | 26 | 60 |
| | | 170±10 | А052-6Ш₂ | 4,5 | 950 | 1070 | | 122 | | | |
| НЖК-3* | 165 | 75±10 | А041-4Ф₂ | 1,7 | 1420 | 1610 | 290 | 90 | 35 | 20 | 70 |
| | | | | | | 1400 | | | | | |
| | | | | | | 630 | | | | | |
| | | | | | | 900 | | | | | |
| НЖК-30* | 25 | 300±25 | А062-8/4Ф₂ | 3,5** | 750** | 1600 | 590 | 92** | 50 | — | 100 |
| | 40 | 500±50 | | 5,0 | 1500 | 525 | | 185 | | | |
| НЖК-29М | 220 | 500±50 | А2-61-4Ш₂ | 13 | 1440 | 1390 | 520 | 155 | 40 | — | 75 |
| | | | | | | 1100 | | | | | |
| | | | | | | 790 | | | | | |
| | | | | | | 1670 | | | | | |
| НЖА-34М | 420 | 300±50 | А2-61-4Ш₂ | 13 | 1440 | 1100 | 520 | 155 | 30 | — | 75 |
| | | | | | | 790 | | | | | |
| | | | | | | 1670 | | | | | |

* Насосы для непереохлажденной жидкости.
** В числителе и знаменателе указаны показатели, соответствующие различным числам оборотов (см. графу 6).

**Обслуживание насосов.** Перед пуском кислородного насоса необходимо проверить наличие смазки в подшипниках электродвигателя и редукторе насоса, присоединить к рампе порожние кислородные баллоны и открыть вентили, сообщающие баллоны с рампой, а затем открыть вентили для продувки кислородопровода и вентиль для отвода кислорода из сальникового уплотнения плунжера насоса. После этого включают электродвигатель насоса. Число оборотов вала насоса следует предварительно установить на требуемую производительность в соответствии с режимом работы воздухоразделительного аппарата или газификационной установки. Производительность насоса регулируют так, чтобы из аппарата отводилось наибольшее количество кислорода заданной концентрации.

Пропуски, появляющиеся в сальнике насоса, устраняют подтягиванием сальника или заменой набивки.

Длительная работа сальника насоса обеспечивается правильной сборкой, хорошим состоянием поверхности плунжера, чистотой применяемого чешуйчатого графита и качеством уплотняющих колец. Очень важно, чтобы при сборке насоса плунжер был расположен точно в центре втулки сальника. Для этого применяют временные центрирующие втулки, выточенные по фактическим размерам плунжера и втулки цилиндра.

Поверхность плунжера должна быть тщательно отшлифована и не иметь царапин и рисок, которые разрушают графитовую сальниковую набивку. Биение плунжера допускается не более 0,015 *м* (при опорах на концах). Чистота обработки поверхности плунжера должна быть ▽▽▽ 9 (ГОСТ 2789—59). Чешуйчатый графит необходимо предварительно промыть от примесей твердых частиц. Для этого графит засыпают в банку с водой, взбалтывают, придавая банке кругообразное движение, а затем плавающие сверху наиболее чистые частицы графита сливают на сетку или марлю и используют (после обезжиривания четыреххлористым углеродом и просушки) для заполнения сальника.

Особенно важное значение имеет правильная, четкая работа и герметичность клапанов кислородного насоса, так как от них в первую очередь зависит коэффициент подачи насоса, а следовательно, и его производительность. При недостаточной производительности насоса понижается производительность кислородного аппарата, к которому подключен насос, что сразу сказывается на уменьшении концентрации отходящего азота.

Причиной нарушения работы клапанов часто является попадание в них влаги при ревизии насоса или отогревании аппарата, что иногда происходит при вскрытии недостаточно отогретого насоса; под клапан может также попасть стеклянная пыль от изоляции. Поэтому, если насос во время рабочей кампании аппарата работал хорошо, не следует без нужды вскрывать его для ревизии. Во избежание попадания частиц стекловолокна или ваты под клапаны применять эти материалы для изоляции насоса не следует.



Насосы снаружи изолируют мипорой-Н, которая легко выгружается из кожуха.

**Расчет насосов**[12]. Производительность насоса $V$ (в *дм³/ч*) для переохлажденной жидкости определяют по формуле

$$V = \lambda V_{оп} = \lambda z F S n \cdot 60 \cdot 10^{-3} \qquad (10.3)$$

где $\lambda$ — коэффициент подачи;
$V_{оп}$ — описываемый плунжером объем, *дм³/ч*;
$z$ — число линий насоса;
$F$ — площадь поперечного сечения плунжера, *см²*;
$S$ — ход плунжера, *см*;
$n$ — число оборотов кривошипного вала или число двойных ходов плунжера в 1 *мин*.

Коэффициент подачи зависит от утечек через клапаны и щелевое уплотнение и составляет от 0,6 до 0,8. Число оборотов берется не более 230 *об/мин*, так как при бо́льшем числе оборотов ухудшается работа клапанов. Ход плунжера выбирают таким, чтобы средняя скорость поршня была равна 0,2—0,6 *м/сек*. Меньшая скорость поршня берется для насосов малой производительности. Средняя скорость поршня равна $c_m = Sn/30$.

Производительность насосов для непереохлажденной жидкости определяют по производительности II ступени, пользуясь уравнением (10.3). Размеры I ступени выбирают такими, чтобы описываемый плунжером объем I ступени был в 2 раза больше, чем II ступени. Описываемый объем I ступени $V^{I}_{оп}$ (в *дм³/ч*) определяют по формуле

$$V^{I}_{оп} = F_I (S - b) n \cdot 60 \cdot 10^{-3} \ дм^3/ч \qquad (10.4)$$

где $b$ — высота заливочных окон, *см*; $b = (0{,}25—0{,}4)S$;
$F_I$ — площадь поперечного сечения плунжера I ст., *см²*.

Повышение температуры жидкости за насосом принимают равным:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Давление нагнетания, *кгс/см²* | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Повышение температуры жидкости, *град* | | | | |
| азота | 6 | 12 | 18 | 24 |
| кислорода | 5 | 10 | 15 | 20 |

Мощность, потребляемую насосом $N$ (в *квт*), определяют по формуле

$$N = \frac{z V_{оп} p \cdot 10^3}{3600 \cdot 102 \eta_{мех}} \qquad (10.5)$$

где $V_{оп}$ — описываемый плунжером объем *дм³/ч* одной линии (для двухступенчатого — объем II ст.);
$p$ — давление нагнетания, *кгс/см²*;
$\eta_{мех}$ — механический к.п.д., принимаемый равным 0,6—0,85 (меньшее значение — для насосов малой производительности).

Мощность электродвигателя берут на 15—20% больше найденной по формуле (10.5). Для двухступенчатых и однолинейных насосов принимают $z=2$.

Рекомендуемые скорости (в *м/сек*): во всасывающей трубе 0,5—1; в нагнетательной трубе и нагнетательном клапане 3—5; во всасывающем клапане 2—3. Для того чтобы клапан работал без стука, высоту его подъема $h$ выбирают исходя из соотношения $hn \leqslant 60$.

## 10.5. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ ЖИДКОГО КИСЛОРОДА[12, 14]

Для газификации сжиженных газов применяют безнасосные газификаторы среднего давления и газификационные установки с жидкостным насосом.

**Безнасосные газификаторы.** Принципиальная схема такого газификатора дана на рис. 10.24. Сосуд *2* газификатора изготовлен из нержавеющей стали Х18Н10Т и снабжен высокоэффективной вакуумно-порошковой изоляцией. Вследствие этого потери при хранении жидкости невелики и отпадает необходимость иметь реципиенты для сбора и хранения газообразного продукта газификации. Сжиженный газ в сосуде *2* находится под давлением, под которым он подается потребителю (или несколько большим). Давление поддерживается автоматически регуляторами давления *8*, расположенными на линии прохождения газообразного кислорода в зоны создания давления в газификатор.

Жидкость из газификатора поступает самотеком в испаритель подъема давления *12*. Регулятор давления *7* установлен на линии газообразного кислорода, поступающего из газификатора в испарительную линию, обеспечивая подачу требуемого количества жидкости из сосуда газификатора в испарители *13* и *14*. Регулятор *6* поддерживает постоянным заданное давление газообразного кислорода в линии, по которой газ поступает к потребителю. В случае необходимости к испарителям *13* и *14* можно подключать и транспортный газификатор. Контрольный вентиль *15* указывает на заполнение газификатора жидкостью до 90% объема.

Аналогичную схему имеет газификатор с сосудом на 8000 *л* жидкого кислорода; его отличие состоит в том, что сосуд расположен горизонтально, а в изоляции отсутствует змеевик для газообразного кислорода.

Для промышленных целей применяют безнасосные газификаторы емкостью от 25 до 20000 *дм*³ жидкого кислорода. Суточные потери на испарение в сосуде газификатора могут колебаться от 0,15% (для емкости 20000 *дм*³) до 7% (для емкости 25 *дм*³) количества жидкости в газификаторе.

Газификатор устанавливают в отдельном огнестойком помещении с бетонным полом и легким перекрытием. Применение асфальтовых полов в помещениях, где хранится жидкий кислород, не



допускается. Дверь и окна помещения должны открываться наружу. В помещении, где установлен газификатор, допускается только центральное паровое или водяное отопление и освещение электрическими лампами в герметической арматуре, причем предохранители, выключатели и рубильники следует располагать вне

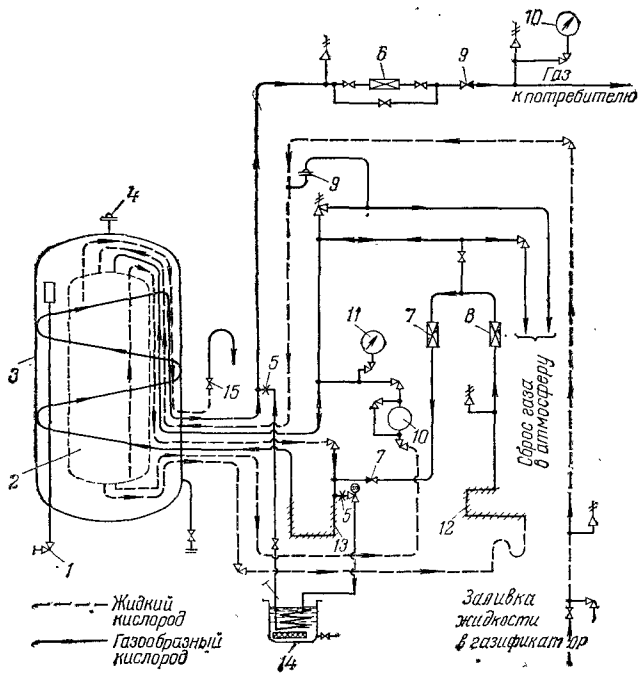



Рис. 10.24. Схема безнасосного газификатора емкостью 2000 *кг* жидкого кислорода:

1 — вакуумный клапан; 2 — сосуд газификатора; 3 — наружный кожух; 4 — предохранительная мембрана на 1 *кгс/см*²; 5 — места присоединения транспортного газификатора к испарителю; 6, 7 и 8 — регуляторы давления; 9 — обратные клапаны; 10 — манометры; 11 — указатель уровня жидкости в газификаторе; 12 — воздушный испаритель подъема давления; 13 — воздушный продукционный испаритель; 14 — продукционный испаритель с электроподогревом; 15 — контрольный вентиль максимального уровня жидкости.

помещения. Должна быть предусмотрена достаточная естественная вытяжная вентиляция помещения. Вся арматура и трубопроводы, расположенные в помещении, изготовляются из меди или латуни.

Курение и зажигание огня в помещениях газификаторов строго запрещается. Арматура щита управления газификатора рекомендуется закрывать стальным щитом с асбестовой прослойкой (оставляя снаружи только маховички) для предохранения персонала на случай вспышки в вентиле при открывании и закрывании последнего.

Перед наполнением газификатора из него выпускают газообразный кислород, затем, соединив гибким шлангом транспортный резервуар и газификатор, наполняют последний жидким кислородом. Газификатор наполняют до красной метки на шкале указателя уровня. Окончив наполнение газификатора, закрывают сливной вентиль на транспортном резервуаре, а через 10—15 *мин* на газификаторе. Затем немедленно отъединяют шланг и закрывают вентиль для выпуска кислорода в газгольдер (или в атмосферу), после чего давление в газификаторе начинает медленно повышаться. Ускоренное повышение давления в газификаторе достигается через пусковой испаритель. Когда давление в системе достигает установленной величины, начинают отбор газа в сеть через подогреватель, открыв соответствующий вентиль на распределительном щите. Если давление в газификаторе повышается, то газ автоматически перепускается из сосуда в сеть потребления. Перед прекращением работы газификатора давление в нем должно быть снижено.

Газификаторы должны обезжириваться в те же сроки, что и емкости для перевозки и хранения жидкого кислорода (см. выше). Сосуды газификаторов обезжиривают путем их заполнения растворителем с применением барботажа потоком азота или воздуха. Можно производить обезжиривание способом конденсации паров растворителя. Испарители газификационных установок обезжиривают циркуляцией через них растворителя; обезжиривание испарителя должно производиться не реже чем через 1000 ч его работы.

После тщательной продувки и удаления остатков растворителя газификатор просушивают сухим азотом или воздухом (не содержащим примеси паров масла) в течение нескольких часов до полного удаления остатков растворителя. Раз в 3 года сосуд газификатора подвергают осмотру и гидравлическому испытанию повторным рабочим давлением. После гидравлического испытания следует особенно тщательно просушить внутреннюю часть газификатора, а также все его трубопроводы и арматуру.

**Газификационные установки с жидкостными насосами***. Такие установки могут применяться в качестве стационарных и передвижных агрегатов. При применении насосов создается возможность газифицировать кислород и азот до давления 400 *кгс/см*², достигнуть которого газификаторами практически невозможно вследствие трудности изготовления соответствующих сосудов для газификатора**.

Схема газификационной установки СГУ-1 с насосом дана на рис. 10.25, *а*. Жидкий кислород из резервуара *5* с вакуумно-поро

* Ю. А. Мирославская, Труды ВНИИкимаш, вып. 10, 1965.

** Газификаторы высокого давления небольшой емкости (до 50 *дм*³) на давление до 150 *кгс/см*² применяются при наполнении баллонов газообразной криптоно-ксеноновой смесью.



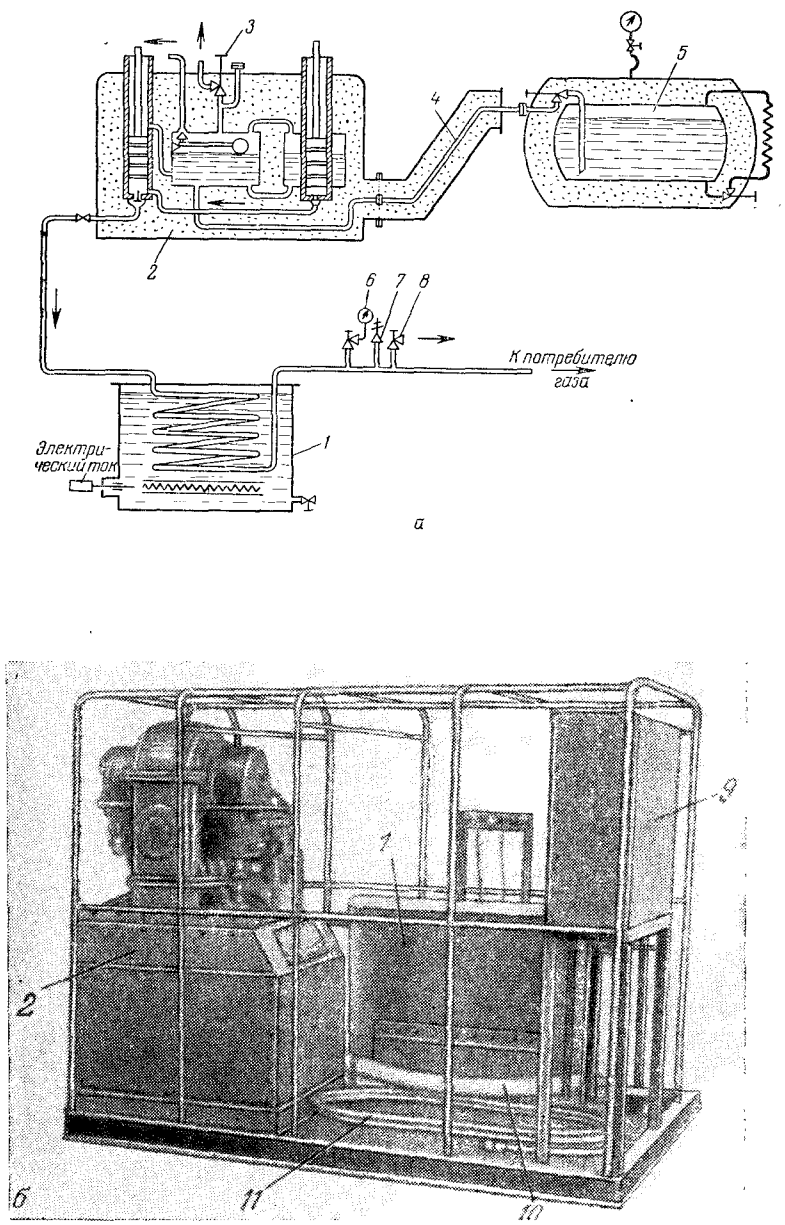



Рис. 10.25. Газификационная установка СГУ-1 с насосом НЖК-1М:
*а* — схема; *б* — общий вид; *1* — испаритель; *2* — насос; *3* — вентиль; *4* — трубопровод; *5* — резервуар с жидким кислородом; *6* — манометр; *7* — предохранительный клапан; *8* — вентиль; *9* — электрощит; *10* — шланг для жидкого кислорода; *11* — шланг для сжатого газообразного кислорода.

ковой изоляцией по изолированному трубопроводу *4* поступа
в жидкостный насос *2* самотеком. В данном случае жидкость
переохлаждена, и поэтому используется двухступенчатый нас
с питанием из бачка через поплавковый клапан. Сброс газа пр
изводится через вентиль *3*. Жидкость насосом подается в змее
испарителя *1*, вода в ванне которого подогревается электронагр
вателем. Образующийся в змеевике газообразный кислород по
соответствующим давлением поступает к потребителю. Давлен
указывается манометром *6*; на трубопроводе потребления имес
предохранительный клапан *7* и вентиль сброса давления *8*. Общ
вид установки дан на рис. 10.25, *б*.

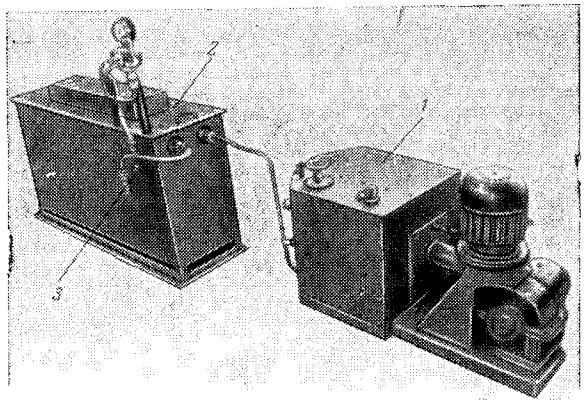



Рис. 10.26. Стационарная газификационная установка СГУ-4 с насос
НЖК-30:
*1* — насос; *2* — испаритель; *3* — обратный клапан на линии сжатого газа.

Для газификации жидкого непереохлажденного кислорода
избыточным давлением 20 *кгс/см*² применяется стационарная
зификационная установка, например типа СГУ-4 (рис. 10.26),
торая состоит из насоса НЖК-30, испарителя жидкого кислор
и электрощита. Жидкий непереохлажденный кислород под и
точным давлением 0,4—0,6 *кгс/см*² поступает из стационарной
кости в насос, которым под давлением 20 *кгс/см*² подается в и
ритель. Газообразный кислород из испарителя через обратный
пан направляется в сеть потребления. Производительн
установки по кислороду 320±40 *м*³/*ч*, по азоту 260±30 *м*³/*ч*.
требляемая мощность 60 *квт*.

На рис. 10.27 показана схема автомобильной газификацио
установки АГУ-6. Установка состоит из транспортного резерв
ТРЖК-5 емкостью 5600 *дм*³, насоса жидкого кислорода НЖК
испарителя, щита арматуры и электрощита. Все оборудов



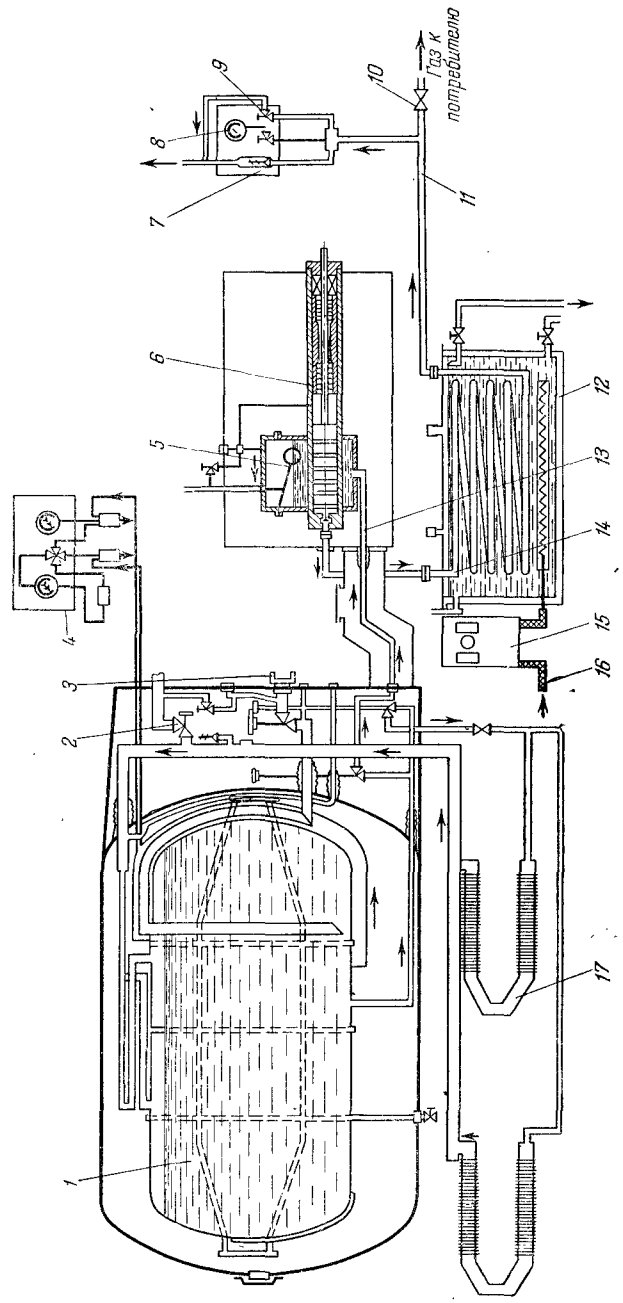



Рис. 10.27. Схема автомобильной газификационной установки АГУ-6:
*1* — резервуар; *2* — вентиль сброса газа из резервуара; *3* — вентиль наполнения резервуара; *4* — щит арматуры резервуара *5* — бак *6* — насос жидкого кислорода НЖК-30; *7* — предохранительный клапан; *8* — манометр; *9* — вентиль сброса газа; *10* — обратный клапан; *11* — трубопровод подачи газа из испарителя; *12* — испаритель; *13* — трубопровод подачи жидкости из резервуара в насос; *14* — трубопровод подачи жидкости из насоса в испаритель; *15* — электрощит; *16* — электрокабель; *17* — испаритель резервуара.

смонтировано на грузовом автомобиле КрАЗ-257. Жидкий кислород в резервуар ТРЖК-5 наливают из железнодорожной, автомобильной или стационарной цистерны. Установка работает на двух режимах: основном (производительность 240±20 *м³/ч*) и форсированном (производительность 450±35 *м³/ч*). Переход с основного режима на форсированный производят переключением двухскоростного электродвигателя насоса, для чего необходима его остановка на 1—2 *мин*. Потери жидкости в установки при хранении — не более 42 *кг/сутки* при окружающей температуре 20 °С.

Газификационные установки могут быть смонтированы на специальной раме, снабженной каркасом для брезента (см. рис. 10.25, *б*). Такие установки переводят на автомашинах или других транспортных средствах и подключают к любому резервуару (стационарному и транспортному) с жидким кислородом или азотом.

Транспортабельная газификационная установка ТГУ-1-300/400 предназначена для газификации непереохлажденных сжиженных газов (кислорода, азота и аргона) на месте их потребления и наполнения баллонов или реципиентов при избыточном давлении до 420 *кгс/см²*. Непрерывная газификация обеспечивается подачей жидкости из резервуаров типа АРЖК-1М, ТРЖК-2М, ТРЖК-2Х, ТРЖК-3, ТРЖК-5 и ТРЖК-8 в резервуар погружного насоса установки. Производительность и другие данные установки ТГУ-1-300/400 приводятся ниже:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Давление нагнетания, *кгс/см²* . . . | До 420 | До 220 | До 165 |
| Производительность, *дм³/ч* . . . . | 300±50 | 360±50 | 375±50 |
| Установленная мощность, *квт* . . | | 75 | |
| Температура газа после газификации, °С . . . . . | | 20±5 | |
| Вес, *Т* . . . . . | | 2,3 | |

Для подогрева воды в испарителях газификационных установок применяются трубчатые электронагреватели типа ТЭН на напряжением 220 *в*. Температура воды регулируется выключением части нагревателей или вручную (установки СГУ-1, УГЖК-1М, СГУ-4) или автоматически с помощью манометрического термометра ЭКТ-1 (установки СГУ-7К, АГУ-2М, АГУ-6, АГУ-8К). Шланги для переливания жидкого кислорода, азота и др. газов изготовляются из гибких металлических рукавов с оплеткой и изоляцией из слоя стекловаты, обмотанной миткалем и лентой из стеклоткани.

Транспортные установки для газификации жидкого кислорода, смонтированные на автомашинах, используются для снабжения кислородом потребителей, находящихся на расстоянии до 200 *км*, расходующих до 500 *м³* кислорода в сутки. Газификационные установки могут применяться также для газификации жидкого азота и жидкого аргона под требуемым давлением.



Основные характеристики газификационных установок различных типов приведены в табл. 10.3.

Газификация жидкого кислорода и выдача его в газообразном состоянии цехам-потребителям или наполнение баллонов осуществ-

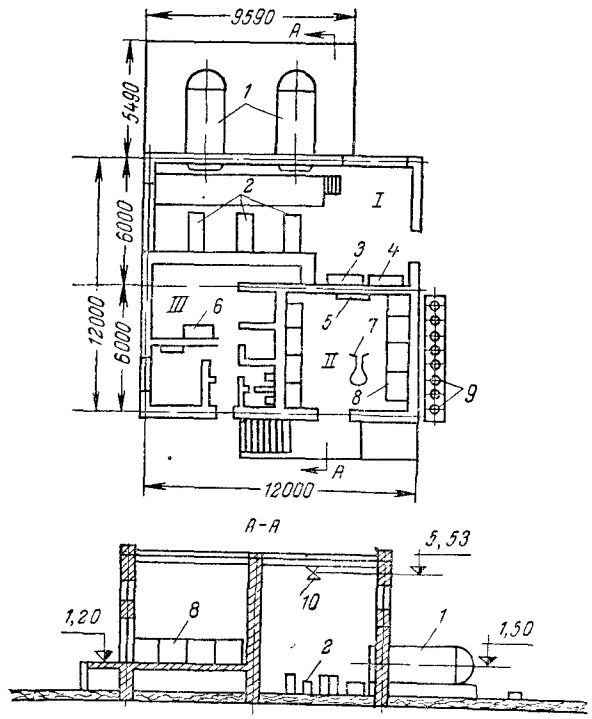



Рис. 10.28. Кислородногазификационная станция (типовой проект): *I* — газификационное отделение; *II* — наполнительное отделение и склад наполненных и порожних баллонов; *III* — вспомогательные помещения; *1* — резервуары ТРЖК-3 для жидкого кислорода; *2* — установки УГЖК-1М для газификации жидкого кислорода; *3* — щит регуляторов давления «до себя»; *4* — щит вентилей высокого давления и редукторов; *5* — наполнительная рампа 2×2 баллона; *6* — стенд с тележкой для вакуумирования сосудов и трубопроводов; *7* — тележка для перевозки одного баллона; *8* — клетки для хранения 20 баллонов; *9* — баллоны 400/200 (ГОСТ 9731—61, чертеж 2) для кислорода (реципиенты); *10* — таль электрическая.

ляется в здании кислородногазификационной станции. На рис. 10.28 приведены план и разрез кислородногазификационной станции по типовому проекту Гипрокислорода. Станция имеет два резервуара ТРЖК-3 на 8 *т* жидкого кислорода каждый. Установленное оборудование позволяет газифицировать кислород и

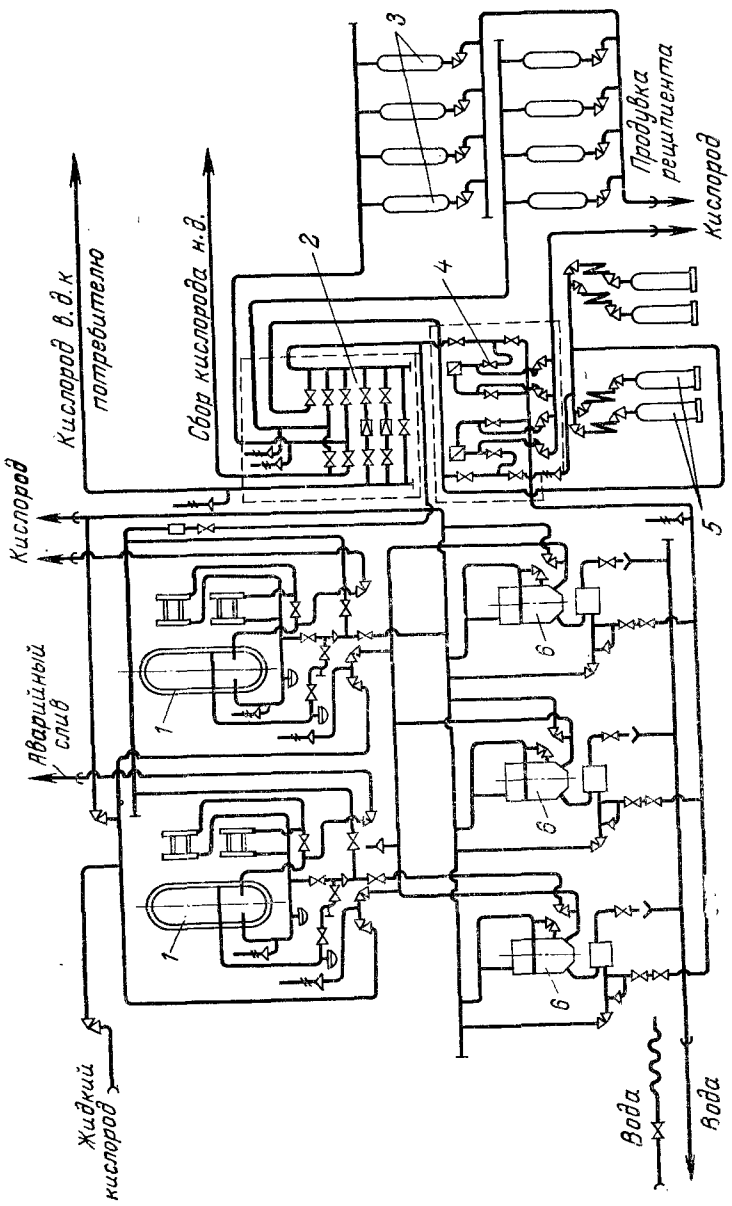



Рис. 10.29. Технологическая схема кислородногазификационной станции:
1 — резервуары ТРЖК-3 для жидкого кислорода; 2 — щит вентилей и редукторов; 3 — баллоны 400/200 (ГОСТ 9731—61, чертеж 2) (реципиенты); 4 — щит регуляторов давления; 5 — наполнительная рампа 2×2 баллона; 6 — установки УГЖК-1М для газификации жидкого кислорода.

Таблица 10.3. **Газификационные установки с насосами для сжиженных газов**[14]

| Установки* | Насосы | Средняя производительность, $м^3/ч$ | | Избыточное давление за испарителем, $кгс/см^2$ | Потребляемая мощность, $квт$ | Габариты, $мм$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | азот | кислород | | | длина | ширина | высота |
| СГУ-1 | НЖК-1М | 160 | 200 | 240 | 35 | 2260 | 1500 | 1710 |
| СГУ-4 | НЖК-30 | 260 | 320 | 20 | 60 | 3860 | 1135 | 1390 |
| УГЖК-1М | НЖК-3 | 47 | 60 | 165 | 13,9 | 2140 | 850 | 1135 |
| СГУ-7К*** | НЖА-34М | 200 | 250 | 420 | 61 | 3500 | 2900 | 2065 |
| АГУ-2М*** | НЖК-29М | 345 | 425 | 220 | 100 | 6700 | 2470 | 3585 |
| АГУ-6 | НЖК-30М | — | 250/500** | 25/40** | 49/90** | 10725 | 2650 | 3570 |
| АГУ-8К*** | НЖК-29 | — | 210 | 220 | 68 | 10650 | 2650 | 3620 |
| КВО-408 | 11НСГ-60/400 | 32 | 40 | 165/420 | 14 | 2275 | 2075 | 1800 |

* С — стационарная установка; А — автомобильная; УГЖК-1М—перевозная, смонтированная на общей раме; КВО 408 — стационарная, транспортабельная.
** Числитель — основной режим, знаменатель — форсированный.
*** Установки в настоящее время модернизированы путем замены насосов типов НЖА и НЖК насосами типа 12НСГ (см. разд. 10.4).

наполнять им 10 баллонов (40-литровых) в 1 *ч* под избыточным давлением 165 $кгс/см^2$. Емкость склада составляет 80 наполненных и 80 порожних баллонов. Для подачи кислорода в сеть под давлением 15 $кгс/см^2$ установлен реципиент, состоящий из 8 баллонов емкостью по 400 $дм^3$ каждый (ГОСТ 9731—61), на общую гидравлическую емкость 3,2 $м^3$. Для обслуживания станции при работе в три смены требуется 6 чел., при работе в две смены 5 чел. Технологическая схема кислородногазификационной станции* дана на рис. 10.29.

* Н. Г. Слуцкая, Кислородная промышленность, № 2 (1970).

ГЛАВА 11

# НАПОЛНЕНИЕ БАЛЛОНОВ

## 11.1. БАЛЛОНЫ ДЛЯ СЖАТЫХ ГАЗОВ

Баллоны применяют для хранения и перевозки газов (воздуха, кислорода, азота, аргона и др.) в сжатом виде под избыточным давлением до 165—200 *кгс/см*². Изготовляют баллоны из стальных цельнотянутых бесшовных труб путем обжатия в штампе днища и горловины.

Толщина стенки баллона должна быть такой, чтобы напряжения, возникающие в ней при гидравлическом испытании, не превышали 85% предела текучести стали, из которой изготовлен баллон.

Емкость (по воде) баллонов для кислорода и других газов (ГОСТ 949—57) составляет 0,4, 0,7, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 27, 33, [illegible] и 50 *л* (*дм*³). Техническая характеристика баллонов:

| | Тип баллона | Давление условное, *кгс/см*² | Гидравлическое давление (пробное), *кгс/см*² | Пневматическое давление (пробное), *кгс/см*² | Предел прочности, *кгс/мм*² | Предел текучести, *кгс/мм*² | Относительное удлинение, % | Ударная вязкость |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Баллоны из углеродистой стали | 100 | 100 | Полутор-ное рабочее | Рабочее | 65 | 38 | 15 | - |
| | 150 | 150 | 225 | 150 | 65 | 38 | 15 | - |
| | 200 | 200 | 300 | 200 | 65 | 38 | 15 | - |
| Баллоны из легированной стали (Л) | 150Л | 150 | 225 | 150 | 90 | 70 | 10 | 1 |
| | 200Л | 200 | 300 | 200 | 90 | 70 | 10 | 1 |

Баллоны 150 и 150Л применяют для кислорода, водорода, аргона, метана, сжатого воздуха и редких газов. Для сжатого воздуха и метана используют также баллоны 200 и 200Л. Для двуокиси углерода применяют баллоны 150, для ацетилена, аммиака и других газов с давлением до 100 *кгс/см*² — баллоны 100.



Наибольшее распространение получили баллоны емкостью 40 *дм*³:

| | |
|---|---|
| Наружный диаметр, *мм* | 219 |
| Толщина стенки, *мм* | |
| 100 и 150Л | 5,2 |
| 150 и 200Л | 7 |
| 200 | 9,3 |
| Длина корпуса баллонов 150 и 200Л, *мм* | 1390 |
| Вес (без вентиля, колпака, кольца и башмака), *кгс* | |
| 100 и 150Л | 43,5 |
| 150 и 200Л | 60 |
| 200 | 81 |

Требования к баллонам для сжатых газов регламентируются правилами Госгортехнадзора. Для каждого газа установлены цвета баллона, надписи и полосы на нем.

| | Цвет баллона | Текст надписи | Цвет надписи | Цвет полосы |
|---|---|---|---|---|
| Азот | Черный | Азот | Желтый | Коричневый |
| Аммиак | Желтый | Аммиак | Черный | — |
| Аргон | | | | |
| сырой | Черный | Аргон сырой | Белый | Белый |
| технический | Черный | Аргон технический | Синий | Синий |
| чистый | Серый | Аргон чистый | Зеленый | Зеленый |
| Ацетилен | Белый | Ацетилен | Красный | — |
| Водород | Темно-зеленый | Водород | Красный | — |
| Воздух | Черный | Сжатый воздух | Белый | — |
| Гелий | Коричневый | Гелий | Белый | — |
| Кислород* | Голубой | Кислород | Черный | — |
| Криптон | Черный | Криптон | Желтый | Желтый |
| Ксенон | Оранжевый | Ксенон | Черный | — |
| Криптоно-ксеноновая смесь | Черный | Криптон-ксенон | Желтый | Желтый** |
| Сернистый ангидрид | Черный | Сернистый ангидрид | Белый | Желтый |
| Сероводород | Белый | Сероводород | Красный | Красный |
| Двуокись углерода | Черный | Углекислота | Желтый | — |
| Фосген | Защитный | — | — | Красный |
| Хлор | Защитный | — | — | Зеленый |
| Прочие газы | | | | |
| горючие | Красный | Наименование газа | Белый | — |
| негорючие | Черный | То же | Желтый | — |

* На баллонах с кислородом, предназначенным для медицинских целей, должна быть наклеена этикетка с надписью «Кислород медицинский».
** Две полосы.

На верхней сферической части баллона выбиты паспортные данные: товарный знак завода-изготовителя, номер баллона, вес в *кг*, емкость в *дм*³, рабочее и испытательное избыточное давление в *кгс/см*², дата изготовления, год следующего испытания, клеймо ОТК завода-изготовителя. Здесь же выбиваются клейма

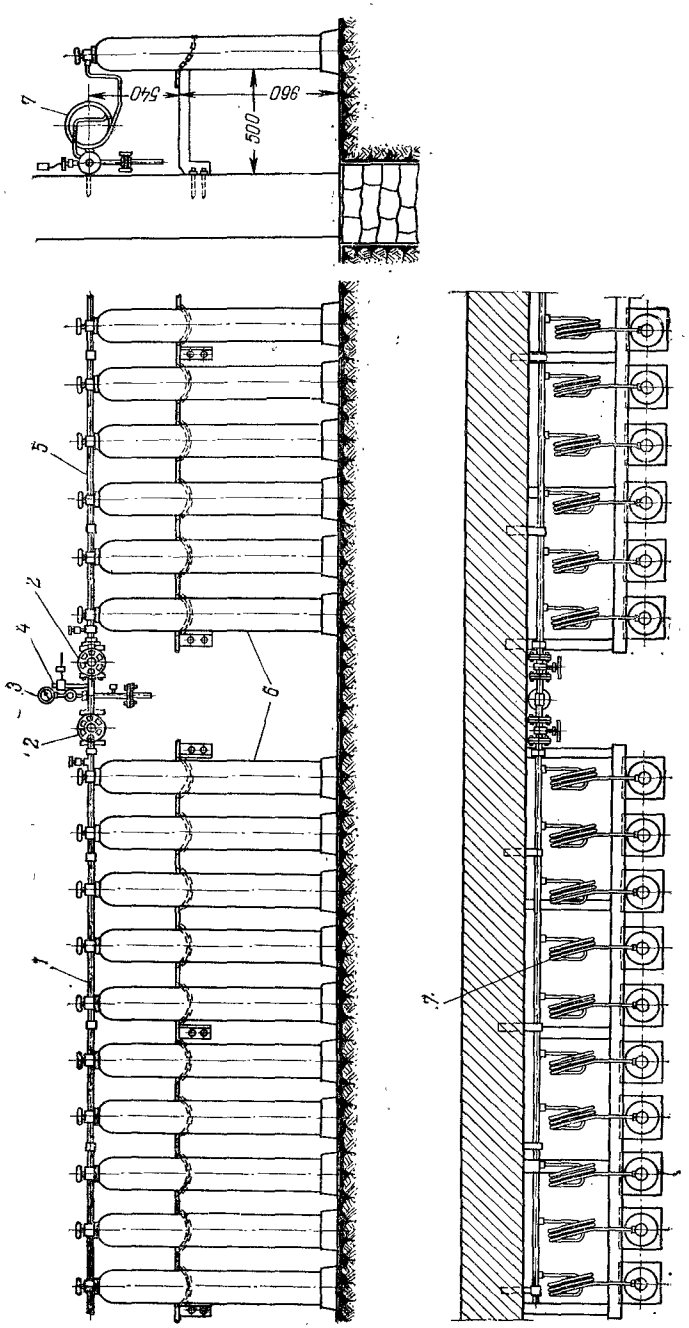



Рис. 11.1. Наполнительная рампа для баллонов:
*1, 5* — коллекторы; *2* — вентили; *3* — манометр; *4* — предохранительный клапан; *6* — баллоны; *7* — змеевики

при последующих периодических испытаниях баллона через каждые 5 лет.

Боковой штуцер вентиля кислородного баллона должен иметь правую трубную резьбу размером $^3/_4$ дюйма. Вентили баллонов для горючих газов (например, водорода) снабжаются левой трубной резьбой $^1/_2$ дюйма во избежание ошибочного наполнения кислородом баллонов из-под горючих газов и наоборот.

## 11.2. НАПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАМПЫ

Наполнение баллонов кислородом производят кислородным компрессором или насосом через наполнительную рампу.

Рампа (рис. 11.1) состоит из двух коллекторов (труб) *1* и *5*, включаемых попеременно вентилями *2*. На рампе смонтированы

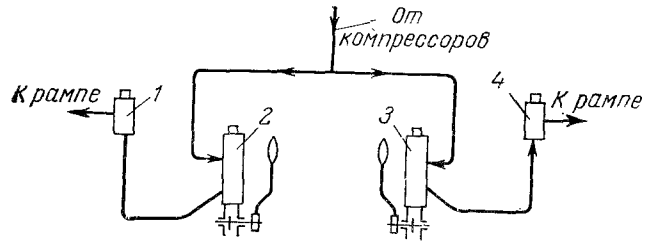



Рис. 11.2. Схема клапанного механизма для переключения рамп:
*1, 4* — обратные шариковые клапаны; *2* — запирающий клапан левой рампы; *3* — запирающий клапан правой рампы.

предохранительный клапан *4* и манометр *3*. Коллекторы изготовляют из труб красной меди, баллоны *6* присоединяют к ним с помощью гибких змеевиков *7* из медных трубок 8×1,5 *мм*. Через один коллектор одна группа баллонов наполняется, а со второго в это время снимают наполненные и устанавливают порожние.

Размеры, количество и конструкции коллекторов наполнительных рамп различны в зависимости от назначения и условий использования.

Для облегчения переключения коллекторов разработан (Н. И. Столяров и М. Г. Бороденков) клапанный механизм, заменяющий рамповые вентили (рис. 11.2). Обратные шариковые клапаны *1* и *4* механизма препятствуют выходу кислорода из наполненных баллонов при открывании запирающих клапанов *2* и *3*. Запирающий клапан *2* открывают поворотом ручки *1* эксцентрика *4* (рис. 11.3). Конструкция запирающего клапана показана на рис. 11.4. Шарик *6* прижимается к седлу *7* обратной пружиной *9* и открывается под действием толкателя *5*, перемещаемого при повороте наружного эксцентрика. Детали клапанов, соприкасающиеся со сжатым кислородом, изготовляются из латуни, а шарики, толкатели и нажимные винты — из нержавеющей стали 1Х18Н9.

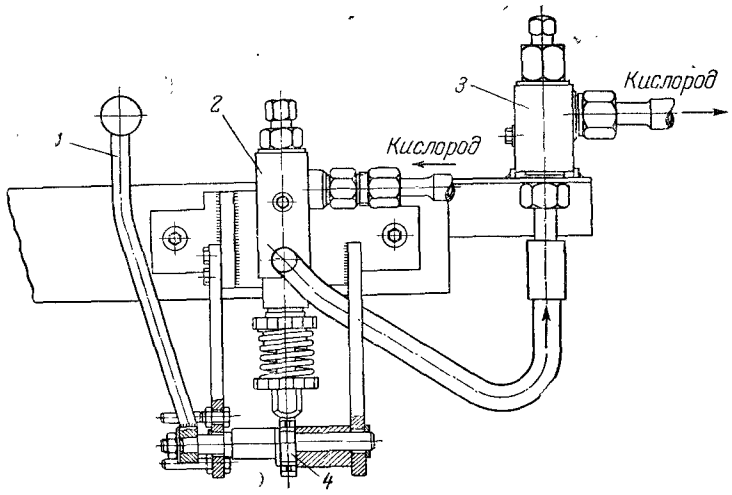



Рис. 11.3. Запирающий и обратный клапаны:
*1* — ручка эксцентрика; *2* — клапан включения; *3* — обратный клапан; *4* — эксцентрик.

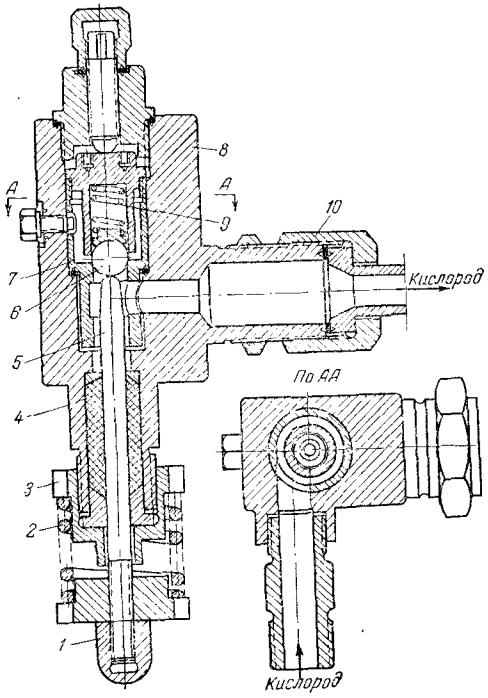



Рис. 11.4. Запирающий кла[illegible] в разрезе:
*1* — колпачковая гайка; *2* — пруж[illegible]; *3* — гайка затяжки сальника; *4* — [illegible]бивка сальника; *5* — толкатель; *6* — [illegible]рик; *7* — седло клапана; *8* — кор[illegible]; *9* — пружина; *10* — накидная г[illegible]

По этому же принципу могут быть разработаны клапаны для автоматического переключения коллекторов рампы при достижении в баллонах заданной величины давления при наполнении.

Трудоемкими операциями являются навертывание и отвертывание накидных гаек для присоединения баллонов к рампе и снятия их после наполнения. Кроме того, при этом изнашивается трудно

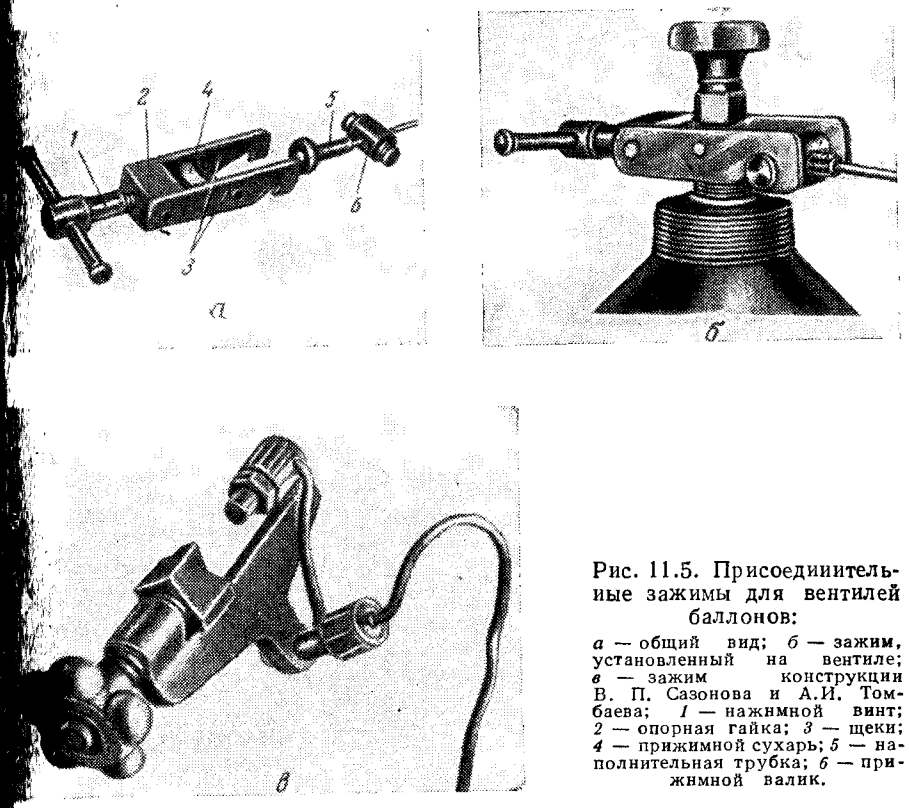



Рис. 11.5. Присоединительные зажимы для вентилей баллонов:
*а* — общий вид; *б* — зажим, установленный на вентиле; *в* — зажим конструкции В. П. Сазонова и А.И. Томбаева; *1* — нажимной винт; *2* — опорная гайка; *3* — щеки; *4* — прижимной сухарь; *5* — наполнительная трубка; *6* — прижимной валик.

восстанавливаемая резьба боковых штуцеров вентилей баллонов и выходят из строя наполнительные медные трубки. Эти недостатки устраняются применением быстродействующего зажима (рис. 11.5, *а* и *б*) для присоединения баллонов к рампе (разработан А. С. Вейшнером и А. И. Муратовым). Этот зажим рекомендуется применять, когда за смену наполняется не более 100 баллонов.

На Ново-Липецком металлургическом заводе применяются винтовые зажимы конструкции В. П. Сазонова и А. И. Томбаева с двухзаходной прямоугольной резьбой; зажимы имеют резиновое уплотнение по внутреннему конусу бокового штуцера вентиля (рис. 11.5, *в*).

На Балашихинском кислородном заводе разработано и применяется присоединительное устройство, в котором используется принцип дифференциального поршня. В этом устройстве штуцер прижимается к вентилю давлением газа; в качестве уплотнителя применяется фторопласт-4.

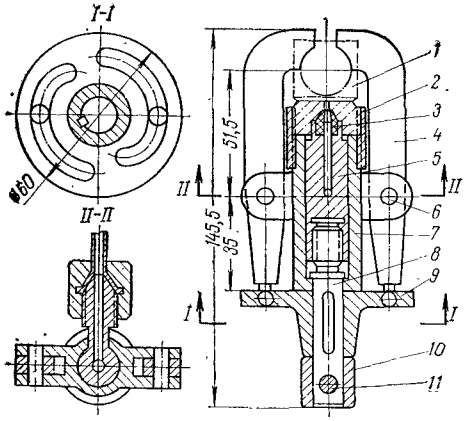



Рис. 11.6. Полуавтоматический рычажной зажим для вентилей баллонов, конструкции Гипрокислорода:

*1* — корпус вентиля; *2* — кольцо; *3* — манжета; *4* — рычаг; *5* — штуцер; *6* — ось; *7* — корпус; *8* — ось, *9* — эксцентрик; *10* — втулка; *11* — вороток.

В механизированных складах баллонов применяются полуавтоматические рычажные зажимы конструкции Гипрокислорода (рис. 11.6).

При использовании различных быстродействующих присоединительных устройств необходимо особенно внимательно следить за тем, чтобы при наполнение кислородом не поступали баллоны с левой резьбой бокового штуцера вентиля (т. е. из-под горючих газов).

Наполнительная рампа размещается в отдельном помещении (наполнительной) при складе баллонов. От здания кислородного цеха, где установлены кислородные компрессоры, в наполнительную подводится кислородопровод высокого давления, прокладываемый в земле ниже уровня промерзания или над землей (если кислород предварительно осушается).

## 11.3. ХРАНЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ БАЛЛОНОВ

Баллоны хранят на складе в вертикальном положении в клетках по 20—25 баллонов в каждой. Помещение для хранения наполненных баллонов отделено стеной от помещения для порожних баллонов. Порожние баллоны доставляют партиями с помощью крана, электротельфера, электрокар и других средств механизированного транспорта. В небольших складах баллоны перевозят на ручных тележках.

На кислородных станциях, поставляющих кислород преимущественно для внутризаводских нужд, газообразный кислород подается к месту потребления по газопроводу под избыточным давлением 20—40 *кгс/см*². В этом случае дополнительно устанавливают батареи баллонов, образующие стационарное газохранилище (реципиенты) газа под высоким давлением. Во время перерывов в работе кислородной установки кислород отбирается из реципиентов.



Наполнительное отделение должно быть связано с кислородным цехом звуковой и световой сигнализацией.

Находящиеся в эксплуатации баллоны подлежат осмотру и гидравлическому испытанию через каждые 5 лет. Перед испытанием баллона из него выпускают весь газ. Затем баллон прочно

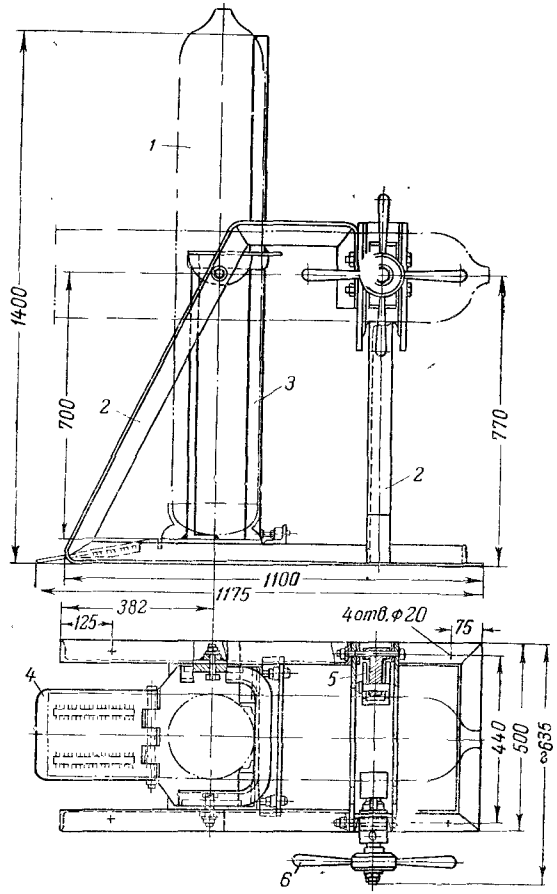



Рис. 11.7. Станок для вывертывания и ввертывания вентилей баллонов:

*1* — баллон; *2* — станина; *3* — поворотная корзина; *4* — откидная платформа; *5* — зажимное устройство; *6* — штурвал.

укрепляют в станке (рис. 11.7) и вывертывают вентиль. Горловина баллона при этом для безопасности должна быть обращена к глухой стене.

Для ввертывания и вывертывания вентилей из баллонов используются механизированные станки, например конструкции П. Г. Неженца (рис. 11.8).

Головка станка (рис. 11.9) работает следующим образом. Вентиль входит в захват *8*, который получает вращение вокруг вертикальной оси посредством шестерни *12*, червяка *11* и червячного

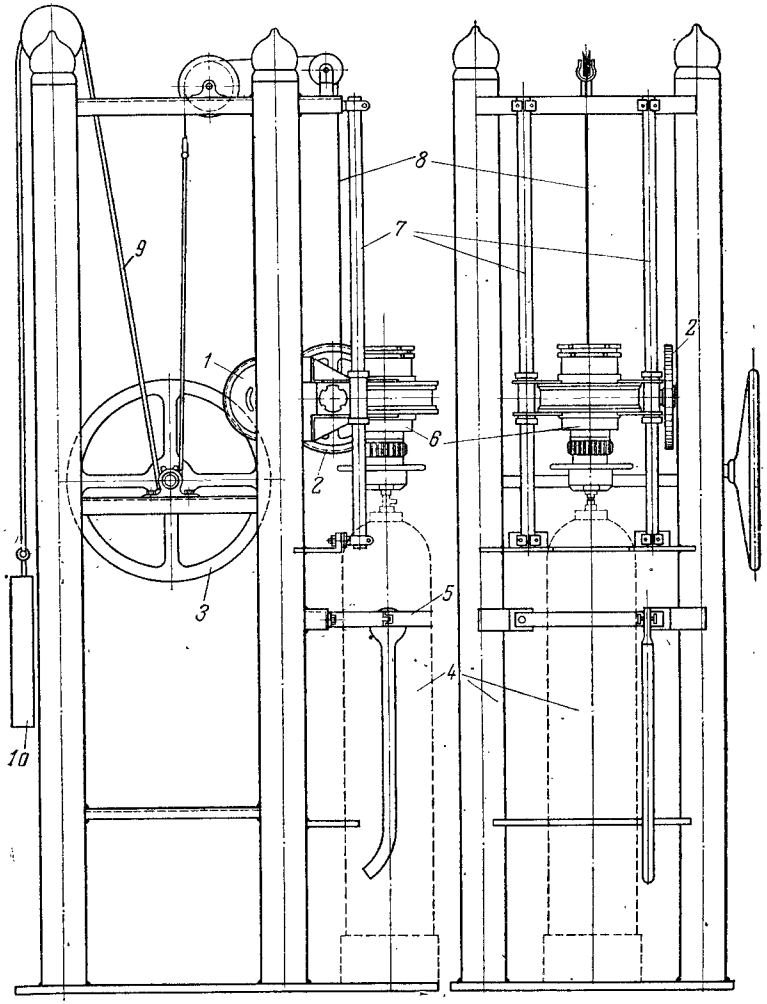



Рис. 11.8. Станок для механизированного вывертывания и ввертывания вентилей баллонов (конструкции Н. Г. Неженца):

*1* — электродвигатель; *2* — червячная шестерня; *3* — маховичок; *4* — баллон; *5* — хомут; *6* — головка для завертывания и отвертывания вентиля; *7* — направляющие; *8* — трос; *9* — цепь; *10* — противовес.

колеса *10*, скрепленного со втулкой *9*. Во втулке *9* на шпонках укреплена верхняя коронка *5*, которая скошенными с одной стороны зубцами *4* передает вращение нижней коронке *6* и через нее —



втулке *7* и захвату *8*, в который входит вентиль баллона. Величина усилия завертывания вентиля определяется усилием пружины *3* и может регулироваться с помощью гайки *2*, закрепляемой контргайкой *1*. При достижении максимума усилия пружина сжимается, и коронка *5* проскакивает по зубцам коронки *6*. Для изменения направления вращения захвата электродвигатель переключают на правое или левое вращение.

Вывернув вентиль, баллон ставят горловиной вниз над ванной и промывают сильной струей воды. Промывку заканчивают, когда вытекающая из баллона вода становится совершенно чистой. После промывки баллоны подвергают внутреннему осмотру, опуская

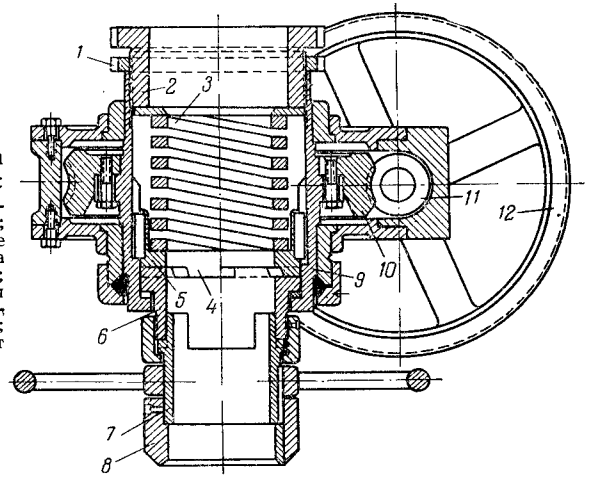



Рис. 11.9. Головка станка конструкции Н. Г. Неженца:

*1* — контргайка; *2* — гайка регулировки нажатия пружины; *3* — пружина; *4* — скошенные зубцы коронки; *5* — коронка верхняя; *6* — коронка нижняя; *7* — втулка; *8* — захват для вентиля; *9* — втулка; *10* — червячное колесо; *11* — червяк; *12* — шестерня, вращаемая от шестерни электродвигателя.

в них электрическую лампочку (напряжение 12 *в*). Если в баллоне обнаружены следы масла, его промывают растворителем, затем водой и просушивают воздухом, подогретым до 60—80 °С. Не разрешается наполнять баллоны, в которых при внутреннем осмотре обнаружены значительная коррозия стенок, раковины, трещины и другие дефекты.

После промывки и внутреннего осмотра баллон взвешивают и определяют его объем, для чего наполняют водой из бачка, снабженного водомерным стеклом со шкалой с делениями через 0,1 *дм*³. Объем можно также определить, взвесив порожний баллон, а затем тот же баллон, но наполненный водой. Количество поместившейся в баллоне воды в килограммах будет равно его объему в литрах (*дм*³).

Результаты измерения веса и емкости баллона могут указывать также на уменьшение толщины стенок баллона вследствие коррозии. Если фактический вес баллона на 7,5—10% меньше веса, обозначенного в паспорте, или если емкость его превысит обозначенную в паспорте более чем на 1,5—2,0%, такой баллон перево-

дят для работы при давлении сжатого газа на 15% ниже указан ного в паспорте. При потере веса от 10 до 15% или увеличени емкости от 2 до 2,5% рабочее давление снижается против уст.

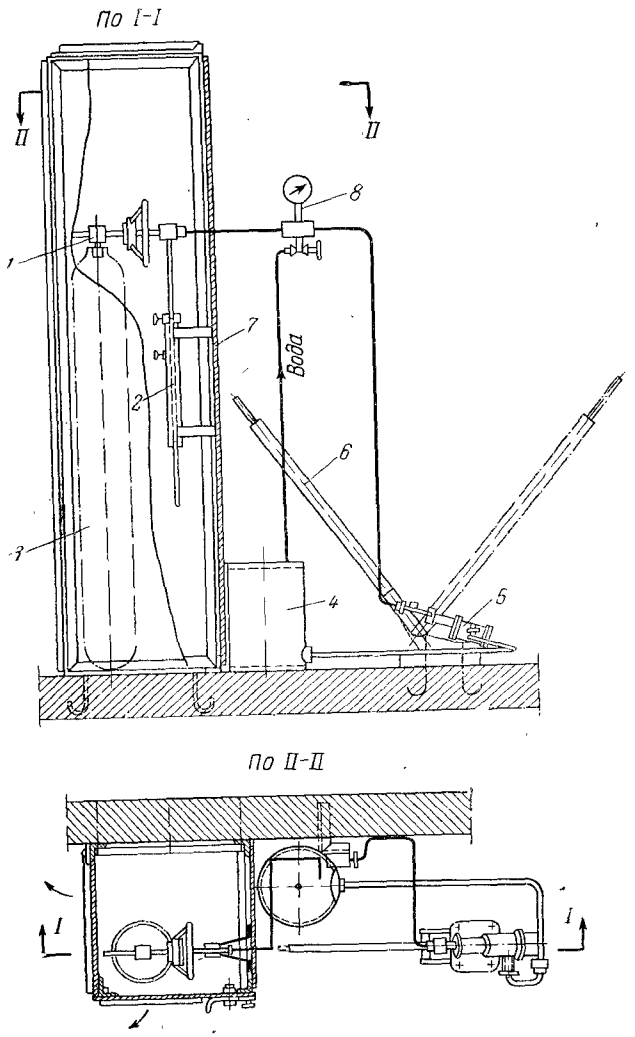



Рис. 11.10. Стенд для гидравлического испытания баллонов:
1 — штуцер; 2 — передвижная рейка для изменения высоты установки штуцера; 3 — баллон; 4 — бак для воды; 5 — гидравлический насос; 6 — рычаг; 7 — стальной шкаф; 8 — манометр.

новленного не менее чем на 50%. При потере веса от 15 до 20 или увеличении емкости от 2,5 до 3% давление снижается на 75% и такие баллоны могут эксплуатироваться при избыточном давл



нии не более 6 *кгс/см²*. Если уменьшение веса баллона превышает 20%, или увеличение емкости составит более 3%, то баллон бракуют окончательно. При изменении паспортных данных баллона он подвергается новому клеймению, а старые клейма зачеканиваются.

После проведения указанных испытаний баллон подвергают гидравлическому испытанию в течение 1 *мин* на избыточное давление 225 *кгс/см²* (рис. 11.10). Баллон *3* наполняют водой, ввертывают в него штуцер *1* и присоединяют к гидравлическому насосу *5*. Насос приводится в движение рычагом *6* от руки или электродвигателем. Если в стенке баллона имеется дефект (трещина, глубокая коррозия и т. п.), то при гидравлическом испытании он может разорваться, поэтому для испытаний баллон устанавливают в стальном шкафу *7* высотой не менее 2 *м*.

Для гидравлического испытания баллонов Гипрокислород рекомендует применять насос-дозатор НД-25Д Рижского турбомеханического завода; максимальная производительность насоса 25 *дм³/ч*, максимальное избыточное давление 250 *кгс/см²*, мощность электродвигателя 1 *квт*, привод — через червячный редуктор.

В баллоны, прошедшие испытания и признанные годными для дальнейшего обращения, ввертывают новые или отремонтированные вентили. Для достижения полной герметичности резьбу хвостовика вентиля смазывают замазкой из свинцового глета, разведенного на дистиллированной воде или жидком стекле.

Результаты осмотра и испытания баллонов записывают в журнал испытаний. В верхней части проверенного баллона ставят новые клейма: а) клеймо завода, на котором производились испытания (круглое, диаметром 12 *мм*); б) дату произведенного и следующего испытаний. Баллон снаружи окрашивают масляной или эмалевой краской соответствующего цвета и наносят установленные надписи. Колпаки окрашивают и просушивают отдельно от баллонов. Баллоны окрашивают пульверизатором (в вытяжном шкафу).

В крупных складах (цехах) для ремонта и испытания баллонов применяют специальные агрегаты, облегчающие и ускоряющие этот процесс (см. разд. 11.5). Такие агрегаты конструкции Гипрокислорода выпускаются промышленностью.

## 11.4. ОБСЛУЖИВАНИЕ НАПОЛНИТЕЛЬНЫХ РАМП

Перед наполнением кислородом каждый баллон осматривает контролер. Пригодные к наполнению баллоны доставляют в наполнительную.

Баллоны присоединяют к рампе, закрепляют цепочками, чтобы предотвратить их падение, и полностью открывают вентили. Паспортные данные баллонов, поставленных под наполнение, записывают в цеховой журнал.

Получив сигнал от машиниста о пуске кислородного компрессора, рабочий, наполняющий баллоны (наполнитель), подает от-

ветный сигнал и начинает постепенно открывать центральный запорный вентиль на той ветви рампы, которая подготовлена к наполнению.

Затем наполнитель проверяет на слух, по шуму идущего через вентили газа, во все ли баллоны поступает кислород. Так как баллоны, заполняемые кислородом, слегка нагреваются, то, приложив к ним руку, можно также удостовериться в поступлении кислорода. Если в какой-либо из баллонов кислород не поступает, этот баллон снимают с рампы и устанавливают причину неполадки.

Пока наполняются баллоны, присоединенные к одному коллектору рампы, к другому присоединяют порожние баллоны, подготовленные для наполнения.

В процессе наполнения баллонов кислород нагревается. После охлаждения газа в баллоне до температуры окружающей среды давление газа соответственно снижается. Зависимость давления кислорода в баллоне от температуры следующая:

| | | |
|---|---|---|
| Номинальное избыточное давление при 20 °С, *кгс/см²* | 150 | 200 |
| Фактическое избыточное давление*, *кгс/см²* | | |
| при —30 °С | 113 | 147 |
| —20 °С | 121 | 158 |
| —10 °С | 128 | 169 |
| 0 °С | 135 | 179 |
| +10 °С | 143 | 190 |
| +20 °С | 150 | 200 |
| +30 °С | 157 | 211 |
| +40 °С | 165 | 221 |

* Указанные фактические давления могут отклоняться на ±5 *кгс/см²* (для номинального давления 150 *кгс/см²*) или ±10 *кгс/см²* (для номинального давления 200 *кгс/см²*).

Наполнение заканчивается, когда давление в баллоне примерно на 10% превышает величину, соответствующую температуре окружающей среды в это время.

При наполнении баллонов необходимо следить за герметичностью соединений на рампе; проверяется мыльным раствором. По окончании наполнения на одном коллекторе рампы подается сигнал машинисту и подачу кислорода переключают на второй коллектор. Вентили наполненных баллонов закрывают, после этого их снимают с рампы, на горловины навертывают колпаки и доставляют на склад наполненных баллонов.

## 11.5. МЕХАНИЗАЦИЯ НА СКЛАДАХ БАЛЛОНОВ

Транспортировка по складу, наполнение и ремонт баллонов являются трудоемкими операциями, которые должны быть максимально механизированы. На крупных складах емкостью до 3000 наполненных баллонов и более внедряются механизированные методы обработки баллонов, разработанные Гипрокислородом для типовых механизированных складов. В таких складах баллоны



предварительно устанавливаются в контейнеры (рис. 11.11) и рамки, в которых подаются для наполнения.

Контейнеры бывают разборные и неразборные (блоки).

В разборные контейнеры устанавливают баллоны тех потребителей, которые расходуют кислород из отдельных баллонов.

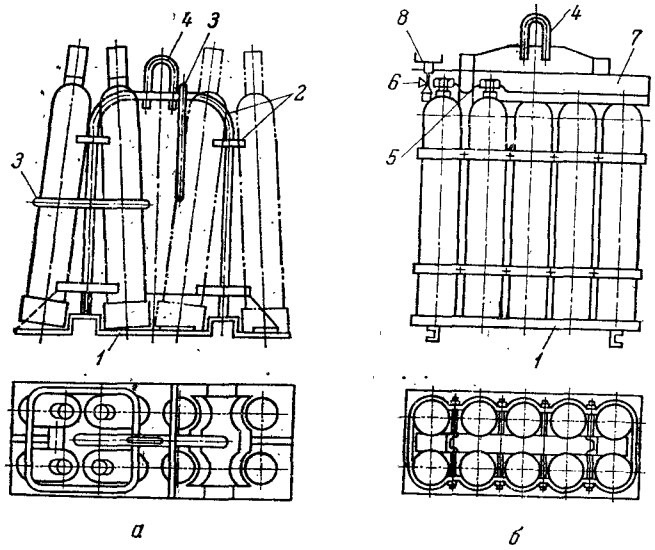



Рис. 11.11. Контейнеры для баллонов:
*1* — разборный; *б* — неразборный; *1* — днище контейнера; *2* — стойки; *3* — съемные кольца; *4* — скоба для подъема; *5* — коллектор для наполнения; *6* — вентиль коллектора; *7* — крышка съемная; *8* — съемный маховичок.

В неразборных контейнерах баллоны сколлектированы между собой, образуя общую емкость. Коллектор блока имеет общий запорный вентиль на все баллоны. Блок состоит из 8—10 баллонов.

Для более мелких потребителей применяют рамки на три баллона. Наполнение баллонов в рамках производят в горизонтальном положении на специальном столе, к которому подведен трубопровод кислорода.

Наполнение баллонов в контейнерах производят на рампе, к наполнительной ветви которой подключается одновременно пять контейнеров.

Для доставки потребителям баллонов в контейнерах сконструирован баллоновоз Т-121 грузоподъемностью 8 *Т*, оборудованный гидравлическими подъемниками и рассчитанный на перевозку 80 баллонов (10 контейнеров по 8 баллонов)*. Применение баллоновозов сокращает объем погрузочно-разгрузочных работ.

* См. Сборник Гипрокислорода «Кислородная промышленность», № 1, 1964, стр. 23.

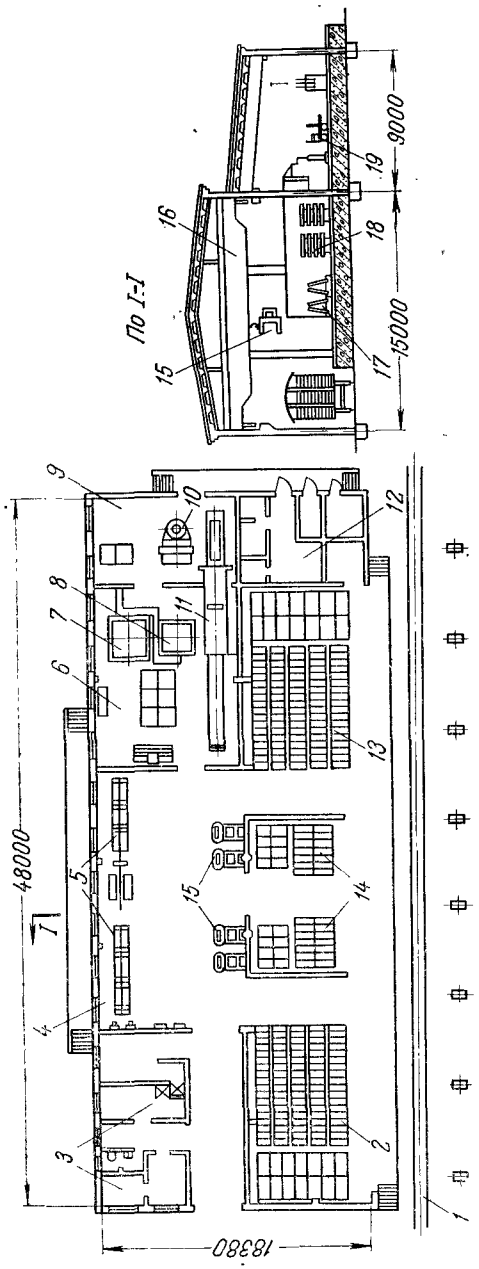



Рис. 11.12. Механизированный склад на 1500 наполненных баллонов:

*1* — железнодорожный путь; *2* — склад на 1000 баллонов; *3* — бытовые помещения; *4* — наполнительная; *5* — монорельс с электротельфером; *6* — ремонтная; *7* — установка для испытания баллонов; *8* — стенд для ремонта баллонов; *9* — окрасочная; *10* — камера для окраски баллонов; *11* — установка для сушки баллонов; *12* — зарядная; *13* — склад на 1000 баллонов; *14* — склад на 500 баллонов; *15* — захваты для баллонов; *16* — мостовой кран; *17* — контейнер на 8 баллонов; *18* — блок на 10 баллонов; *19* — аккумуляторные погрузчики.

Транспортировку порожних и наполненных баллонов в контейнерах через склад и наполнительную, а также погрузку в вагоны производят с помощью аккумуляторных погрузчиков (электрокар на 0,75 и 1,5 *Т*) и мостовых кранов. Отдельные баллоны транспортируют электротельфером.

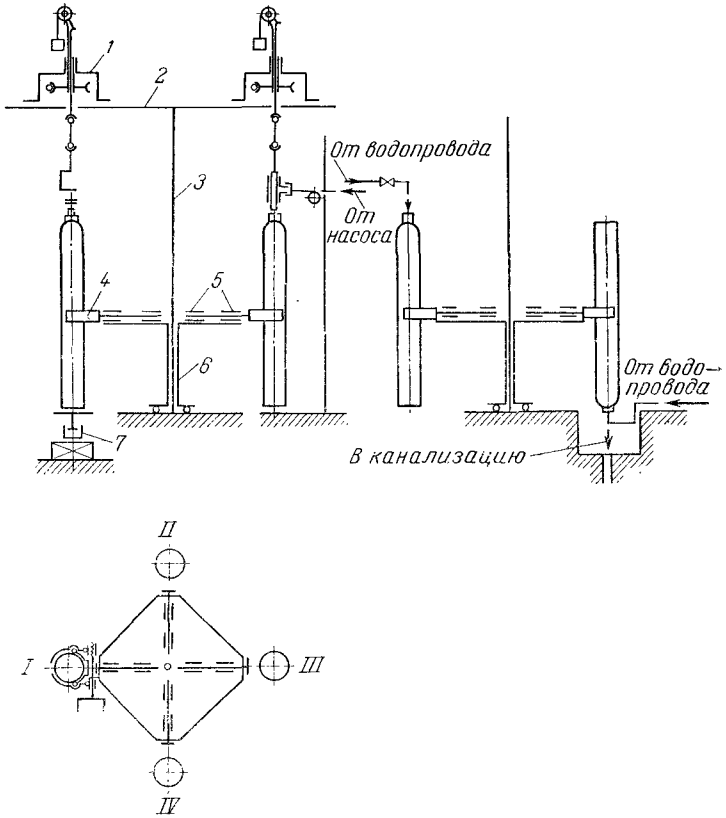



Рис. 11.13. Стенд для ремонта баллонов:

*I, II, III, IV* — рабочие места; *1* — станок для отвертывания вентилей; *2* — неподвижный стол; *3* — станина; *4* — поворотные тиски; *5* — опоры; *6* — поворотный стол; *7* — пневматический подъемник.

На рис. 11.12 показан механизированный склад на 1500 наполненных баллонов. Вагоны и автомашины с баллонами подаются к разгрузочной эстакаде, идущей вдоль склада. Контейнеры разгружают мостовым краном, перекрывающим площадь эстакады и склада. Внутри склад разделен на отсеки железобетонными перегородками высотой 2,5 *м*. Отсеки сообщаются проемами без дверей. Пол склада поднят над уровнем земли на высоту 1,1 *м*.

Ремонт баллонов производится на специальном агрегате — стенде (рис. 11.13), в котором имеется станина *3*, поворотный

стол *6*, неподвижный стол *2*, станок *1* для отвертывания вентилей и пневматический подъемник *7*. На поворотном столе в подвижных опорах *5* закреплены поворотные тиски *4* для зажима баллонов. Тиски вместе с баллонами могут поворачиваться на 360° вокруг горизонтальной оси. На рабочем месте *I* отвертывают вентили и поворачивают баллон вниз горловиной. На рабочих местах *II*, *III* и *IV* производят слив конденсата, промывку баллона изнутри струей воды, слив воды. Затем баллон вновь возвращают на рабочее место *I*, где производят внутренний осмотр его с помощью лампочки, и, если баллон не требует гидроиспытания, в него ввертывают вентиль. Отбракованные баллоны и баллоны для гидроиспытания откатывают в штабель, не ввертывая вентилей.

Взвешивание, определение емкости и гидравлические испытания баллонов производят на специальном агрегате аналогичного устройства, но отличающемся оборудованием рабочих мест. Этот агрегат на рабочем месте *I* имеет пневматический подъемник, установленный на весах для взвешивания баллона в момент его подъема. На рабочем месте *II* находится приспособление для заполнения баллона водой, а на месте *III* — приспособление для гидроиспытания. Сначала порожние баллоны ставят на все четыре рабочих места, а затем их последовательно взвешивают на рабочем месте *I* и наполняют водой на рабочем месте *II*. Затем поочередно взвешивают наполненные водой баллоны и производят их отбраковку. После взвешивания баллоны испытывают гидравлически на рабочем месте *III*, а затем на рабочем месте *IV* переворачивают вниз горловиной и опорожняют. Далее баллоны вновь поступают на рабочее место *I*, где ввертывают вентили и клеймят баллоны.

Баллоны окрашивают пневматическими распылителями в камере, куда баллоны подаются электротельфером. После окраски баллоны на тележке направляют в сушильную камеру партиями по 40 шт. Продолжительность сушки 1,5 *ч*.

Производительность механизированной ремонтной мастерской в смену составляет: по ремонту баллонов — 90 шт.; по гидроиспытанию — 20 шт.; по окраске — 120 шт. Производительность наполнительной — 260 *м*³/*ч*, т. е. 44 баллона в 1 *ч*., или 1050 баллонов в сутки.

ГЛАВА 12

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ КИСЛОРОДА

Правильное ведение технологического процесса и соблюдение установленных режимов работы оборудования воздухоразделительной установки обеспечивает максимальный выход продуктов разделения воздуха при минимальном удельном расходе энергии и вспомогательных материалов, а также безопасность и безаварийность работы агрегатов.

Аппаратчик должен хорошо знать технологический процесс и способы его регулирования на различных этапах работы установки, изучить особенности применяемого оборудования и обеспечить оптимальные режимы его эксплуатации. Большое значение имеет высокое качество монтажа и ремонта оборудования, тщательная проверка его перед пуском в работу, своевременное обнаружение и устранение неполадок и дефектов в работе, строгое соблюдение графика осмотров и ремонтных работ.

Технологический процесс получения кислорода включает следующие основные этапы:

1) подготовку установки к пуску;
2) пуск установки;
3) установление нормального режима работы;
4) периодический отогрев и продувку аппаратов;
5) остановку машин, аппаратов.

Пуск установки — ответственный этап; во время пуска происходит охлаждение всех частей воздухоразделительного аппарата от положительных до очень низких рабочих температур. Поэтому в пусковой период необходимо максимально использовать холодопроизводительность цикла. Необходимо также обеспечить постепенное и равномерное охлаждение частей аппарата во избежание их повреждения из-за деформаций от изменения температуры. Кроме того, режим пуска должен быть таким, чтобы исключалась возможность: 1) забивки холодных частей воздухоразделительного аппарата кристаллами льда и твердой двуокисью углерода, 2) накапливания ацетилена в конденсаторах и других частях блока разделения. Накапливание твердого ацетилена возможно при вы-

паривании жидкости (содержащей ацетилен) и представляет большую опасность, так как грозит взрывом аппарата.

Перед пуском должна быть произведена проверка всей установки.

Если пуск проводится после монтажа или ремонта, то предварительно все воздухопроводы перед подачей воздуха в блок разделения должны быть тщательно продуты для очистки от ржавчины, окалины и других загрязнений. Чем больше перерыв между окончанием монтажа и пуском, тем длительнее должна быть продувка. В случае необходимости отдельные участки должны подвергаться обстукиванию и механической очистке. Затем трубопроводы присоединяют к блоку разделения и продувают трубки теплообменников и регенераторы. Насадку регенераторов продувают, подавая в азотные и кислородные регенераторы соответственно 30—35 и 18—25% часового количества перерабатываемого воздуха. Для лучшего выноса пыли из регенераторов и повышения скорости воздуха избыточное давление в них поддерживают низким, примерно 1—1,5 *кгс/см*$^2$.

Продувку производят до притирки распределительных клапанов. Окончить продувку можно при содержании не более 0,005 *мг/дм*$^3$ пыли в воздухе после регенераторов.

Во время проверки установки регулируют предохранительные клапаны, определяют герметичность соединений аппаратов и коммуникаций; допустимое падение давления в системе в течение 1 ч составляет: при 200 *кгс/см*$^2$—5 *кгс/см*$^2$, при 6 *кгс/см*$^2$—0,2 *кгс/см*$^2$, при 0,7 *кгс/см*$^2$—0,1 *кгс/см*$^2$. Затем проверяют герметичность трубчатых аппаратов и отсутствие перетока в них воздуха из полостей высокого давления в полости низкого давления, а также проходимость импульсных трубок к контрольно-измерительным приборам, коммуникаций и арматуры.

В установках с регенераторами проверяют работу механизма переключения клапанов, действие и герметичность приказных клапанов и клапанов принудительного действия, соответствие работы клапанов заданной цикловой диаграмме переключения. Испытывают также механизм защиты турбодетандеров от разноса и арматуры с дистанционным управлением, убеждаются в правильности сборки установки в целом, герметичности кожуха и других объектов монтажа.

Если установка пускается после очередного отогрева, то проверяют лишь те элементы, работа которых вызывает сомнение или осмотр которых предусмотрен инструкцией и графиком текущих осмотров и ремонтов.

Порядок проверки, продувки и пуска блока разделения воздуха определяется технологической схемой блока и конструкцией его аппаратов. Этот порядок предусмотрен в инструкции по обслуживанию воздухоразделительной установки, которую обслуживающий персонал обязан тщательно изучить и которой должен руководствоваться при ведении технологического процесса.



Рассмотрим особенности технологического процесса получения кислорода на примерах типовых воздухоразделительных установок, начав с наиболее простого — установки высокого давления с дросселированием.

## 12.1. ПОЛУЧЕНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО КИСЛОРОДА НА УСТАНОВКАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

### 12.1.1. Подготовка к пуску воздухоразделительного аппарата

Перед пуском воздухоразделительного аппарата необходимо:

закрыть вентили на коллекторе для отогрева аппарата; вентили спуска жидкости из конденсатора, испарителя и карманов конденсатора; вентили продувочные, для анализов и контрольные; вентиль на трубе отвода кислорода в газгольдер; воздушный дроссельный вентиль; вентили, отключающие адсорбер ацетилена от верхней колонны; кислородный дроссельный вентиль;

открыть вентиль на трубе отходящего азота, вентиль выпуска кислорода в атмосферу и азотный дроссельный вентиль.

До пуска в работу воздухоразделительный аппарат должен быть полностью отогрет и тщательно продут. Запорные вентили к указателям уровня жидкости следует открыть и проверить правильность уровня жидкости в указателях (уровни должны находиться против нулевого деления шкалы). Необходимо также частично открыть вентили на трубопроводе подвода воздуха высокого давления к теплообменнику.

### 12.1.2. Пуск воздухоразделительного аппарата

Направление основных потоков воздуха и отходящих газов в период пуска установки высокого давления с дросселированием показано на рис. 12.1. Период пуска установки можно условно разделить на два этапа: первый — охлаждение блока разделения воздуха; второй — накопление жидкости.

Первый этап. Пускают в работу воздушный компрессор. Перед подачей воздуха в воздухоразделительный аппарат тщательно продувают воздушную линию до дроссельного вентиля высокого давления включительно. Когда избыточное давление перед теплообменником достигнет 180—200 *кгс/см*$^2$ полностью открывают вентили воздуха высокого давления перед теплообменником, затем постепенно открывают воздушный дроссельный вентиль *8* на щите управления. Одновременно проверяют герметичность вентилей, фланцев и прочих соединений. В случае обнаружения пропуска в каком-либо месте следует полностью снизить давление и устранить дефект.

В установках со щелочной очисткой воздуха от $CO_2$ воздух в начале пускового периода не пропускают через скруббер (для эко-

номии щелочи), пока температура воздуха перед дроссельным вентилем не снизится до минус 100 °С, так как при этой температуре двуокись углерода еще не может выделиться в твердом виде внутри воздухоразделительного аппарата и его коммуникаций. В этот период пуска воздух пропускают через обводной вентиль, минуя скруббер (декарбонизатор).

Включение аппаратов, заполненных адсорбентами (адсорберов блоков осушки, блоков комплексной очистки и осушки воздуха цеолитами, адсорберов ацетилена), следует при пуске производить только тогда, когда давление воздуха перед ними повысится до рабочего давления, установленного инструкцией по обслуживанию. В противном случае возможно истирание адсорбента и унос его пыли в коммуникации и аппараты блока разделения вследствие повышенной скорости прохождения потока воздуха через адсорбент.

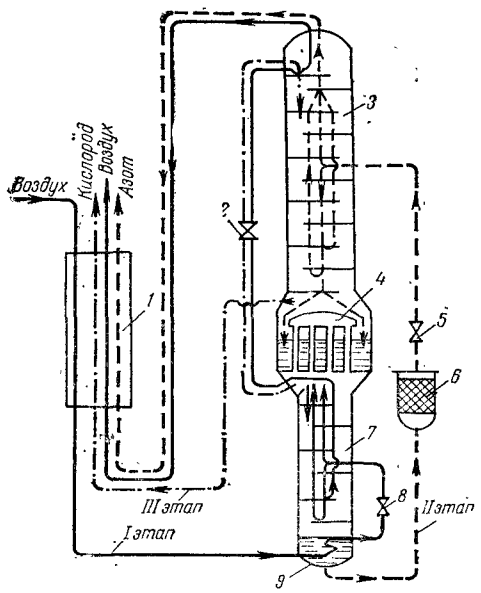



Рис. 12.1. Схема потоков при пуске установки высокого давления с дросселированием:

*1* — теплообменник; *2* — азотный дроссельный вентиль; *3* — верхняя колонна; *4* — конденсатор; *5* — кислородный дроссельный вентиль; *6* — адсорбер ацетилена; *7* — нижняя колонна; *8* — воздушный дроссельный вентиль; *9* — куб нижней колонны.

При охлаждении блока разделения воздуха отключенные аппаратов, по которым в данный момент пуска не проходит холодный воздух, должно быть не полным. Если эти аппараты отключить полностью, то находящийся в них воздух охладится, давление станет ниже атмосферного и обечайка аппарата может быть смята внешним атмосферным давлением. Для предупреждения этого явления на некоторых аппаратах даже устанавливают специальные противовакуумные вентили. Учитывая сказанное, например, адсорберы ацетилена на потоке кубовой жидкости, должны при пуске иметь закрытыми только вентили на выходе жидкости из адсорбера. Вентили же на входе жидкости в адсорбер в период охлаждения нижней и верхней колонн должны быть частично открыты.

Воздушный дроссельный вентиль следует открывать лишь настолько, чтобы избыточное давление в нижней колонне не превышало 6 *кгс/см*², а в верхней колонне составляло не более 0,6 *кгс/см*². Холодный расширенный воздух, уходящий наружу через азотную и кислородную секции теплообменника, постепенно охлаждает поступающий воздух высокого давления, а следовательно, и соответствующие части воздухоразделительного аппарата.



При пуске необходимо, чтобы давление в нижней колонне было минимальным, а после компрессора — максимальным. Вращать маховичок дроссельного вентиля следует медленно и постепенно, так как резкие и внезапные повороты нарушают работу воздухоразделительного аппарата, а также могут привести к поломке вентиля.

Второй этап. Примерно через 4—6 *ч* работы установки указатель уровня жидкости показывает появление жидкости в кубе *9* нижней колонны (см. рис. 12.1). При нормальной работе воздухоразделительного аппарата уровень жидкости в кубе должен соответствовать 5—10 *см* по шкале указателя. Для того чтобы предотвратить истирание силикагеля потоком газообразного воздуха, адсорбер ацетилена включают тогда, когда в кубе *9* нижней колонны накопится достаточное количество жидкости. Затем открывают кислородный дроссельный вентиль *5* и направляют жидкость через адсорбер *6* в верхнюю колонну *3*.

Через 1—1,5 *ч* с начала периода накопления жидкости в кубе нижней колонны должна появиться жидкость в конденсаторе *4*, что видно по соответствующему указателю уровня. После того, как уровень жидкости в конденсаторе достигнет примерно 30 *см**, азотный и кислородный дроссельные вентили следует прикрыть на один оборот. Если уровень жидкости через 5—8 *мин* не снизится, вентили можно прикрыть еще на один оборот. В дальнейшем вентили продолжают прикрывать только после поднятия уровня жидкости до первоначального. Постепенное прикрывание дроссельных вентилей продолжают до тех пор, пока они не останутся открытыми только на один оборот.

Прикрытие азотного дроссельного вентиля увеличивает давление в нижней колонне, что, в свою очередь, повышает температуру конденсации азота и обеспечивает разность температур в конденсаторе, необходимую для конденсации азота в трубках и испарения жидкости в межтрубном пространстве. Кислородный дроссельный вентиль должен быть открыт настолько, чтобы количество кубовой жидкости, проходящее через адсорбер в верхнюю колонну, обеспечивало постоянство уровня жидкости в кубе нижней колонны. Прикрывать азотный дроссельный вентиль следует медленно, так как иначе давление в нижней колонне быстро возрастает. Это вызовет увеличение конденсации азота в трубках и испарение жидкости в межтрубном пространстве конденсатора, вследствие чего уровень ее в конденсаторе будет снижаться, что недопустимо.

Регулирование дроссельными вентилями производят до тех пор, пока они не окажутся в наилучшем для работы данного аппарата положении, обычно указываемом в инструкции. Во время регулирования режима азотными и кислородными дроссельными вентиля-

* Для ускорения наладки режима можно уровень жидкости в конденсаторе доводить до 50 *см*.

ми вентиль на трубе для выпуска кислорода в атмосферу следует несколько прикрыть, чтобы увеличить поступление паров из конденсатора в верхнюю колонну; это сокращает период установления нормального режима ректификации в верхней колонне.

### 12.1.3. Установление нормального режима работы

После того как положение дроссельных вентилей будет отрегулировано и на тарелках верхней и нижней колонн накопится жидкость, начинается процесс получения кислорода концентрации 99,5—99,7%. Для этого через каждые 10—20 *мин* производят анализ кислорода, отбирая пробы через кран на трубопроводе отходящего кислорода. Концентрацию жидкого азота из карманов конденсатора определяют каждые 20—30 *мин*, для чего через вентили на щите управления отбирают пробы из карманов конденсатора и обогащенной кислородом жидкости из куба нижней колонны.

При нормально протекающем процессе содержание кислорода в кубовой жидкости будет в пределах* 40—50%, а в жидком азоте из карманов составит 4—6%. Наладку режима ведут с отбором газообразного кислорода в количестве, не превышающем 50—60% нормальной производительности воздухоразделительного аппарата.

Если концентрация кислорода ниже 99%, прикрывают вентиль на трубе отвода кислорода в атмосферу. Это способствует повышению концентрации кислорода вследствие увеличения подачи паров в верхнюю ректификационную колонну.

Повышенное содержание азота в жидкости из карманов конденсатора указывает на понижение концентрации кислорода в жидкости испарителя. В этом случае немного открывают азотный дроссельный вентиль и следят за концентрацией отходящего кислорода, которая не должна снижаться.

После того как концентрация отходящего кислорода достигнет 99%, вентиль на трубе отвода кислорода в атмосферу полностью закрывают, предварительно открыв на этой трубе вентиль для отвода кислорода в газгольдер. Открытие вентиля следует отрегулировать так, чтобы выход кислорода был наибольшим при концентрации его не ниже 99,5—99,7%, а отходящего азота — не ниже 98%. Наивыгоднейшая степень открытия вентиля для отвода кислорода в газгольдер определяется опытным путем, а также указывается в паспорте воздухоразделительного аппарата. Этот вентиль следует открывать постепенно, увеличивая отбор кислорода в то случае, если его концентрация не уменьшается, а наоборот, повышается, приближаясь к 99,5—99,7%.

После накопления в конденсаторе необходимого количества жидкости начинают постепенно уменьшать холодопроизводительность установки. Для этого снижают давление воздуха перед теплообменником с 200 до 40—60 *кгс/см²*, медленно открывая воздушный дроссельный вентиль и следя за тем, чтобы избыточное давление в нижней колонне не поднималось выше 6 *кгс/см²*, а в верхней колонне — выше 0,6 *кгс/см²* и чтобы уровень жидкости в конденсаторе оставался постоянным. Если давление в колоннах или уровень жидкости в конденсаторе начнет изменяться, воздушный дроссельный вентиль следует снова прикрыть. Если давление в нижней и верхней колоннах будет ниже указанных пределов, а жидкость в конденсаторе достигнет первоначального уровня, продолжают постепенное снижение давления воздуха, открывая воздушный вентиль и одновременно следя за давлением и уровнем жидкости.

Во время пуска и наладки необходимо особо следить за содержанием ацетилена в перерабатываемом воздухе (для чего в установленные инструкцией сроки определяют содержание ацетилена в кубовой жидкости и жидкости конденсатора) и принимать необходимые меры в случае повышенного его содержания (см. гл. 14).

**Обслуживание воздухоразделительного аппарата в установившемся режиме.** Правильность режима работы аппарата определяют по результатам анализа отходящих кислорода и азота, кубовой жидкости и жидкого азота в карманах конденсатора, а также по температуре воздуха и отходящих газов и уровням жидкости в аппаратах. Замеры и анализы производят через каждый час и результаты записывают в журнал. Диаграммы приборов-самописцев прикладывают к журналу.

Нормальный режим работы аппарата характеризуется следующими показателями:

| | |
|---|---|
| Избыточное давление воздуха, *кгс/см²*, не более | |
| перед теплообменником | 60 |
| в нижней колонне | 6 |
| в верхней колонне | 0,6 |
| Высота уровня жидкости, *см* | |
| в испарителе | 10—15 |
| в конденсаторе | 20—40 |
| Разность температур на теплом конце теплообменника, *град*, не более | 6 |
| Содержание, % | |
| кислорода в кубовой жидкости | 40—50 |
| азота в жидкости из карманов конденсатора, не менее | 96—98 |
| Конденсация, % | |
| получаемого газообразного кислорода, не менее | 99,5—99,7 |
| отбросного газообразного азота | 98 |

### 12.1.4. Регулирование процесса ректификации и теплового режима аппарата

В процессе работы приходится регулировать режим ректификации — по результатам анализов состава продуктов разделения и тепловой режим — по данным замеров уровней жидкости в конденсаторах и измерения температур.

**Регулирование режима ректификации.** Из материального баланса работы аппарата двойной ректификации следует, что ректифика-

* Для аппаратов, имеющих змеевик в кубе нижней колонны.

ция в верхней колонне зависит от количества и состава подаваемых в нее продуктов разделения воздуха из нижней колонны (см. гл. 3). Количество жидкого азота, получаемое в нижней колонне и используемое затем в качестве флегмы для орошения верхней части верхней колонны, при постоянной подаче в аппарат воздуха определяется составом жидкости в карманах конденсатора и кубе нижней колонны. Чем выше концентрация азота в карманах конденсатора и чем ниже концентрация кислорода в кубовой жидкости, тем меньшее количество азотной флегмы требуется подавать в верхнюю колонну для получения заданной степени разделения воздуха.

Содержание кислорода в кубовой жидкости зависит от способа подвода воздуха в куб нижней колонны. При подаче в куб воздуха в виде насыщенного пара (без змеевика) кубовая жидкость содержит 34—36% кислорода. При подаче в середину нижней колонны с предварительным проходом через змеевик-испаритель воздух подвергается частичной ректификации на тарелках нижней части колонны и содержание кислорода в кубовой жидкости равно 42—44%. В таких аппаратах можно подавать в верхнюю колонну больше азотной флегмы из карманов конденсатора.

Состав продуктов разделения в нижней колонне можно регулировать только азотным дроссельным вентилем, изменяя отбор жидкости из карманов конденсатора. При этом соответственно меняется и состав кубовой жидкости вследствие изменения распределения азота между верхними и нижними тарелками нижней колонны. С помощью кислородного дроссельного вентиля регулируют только уровень жидкости в кубе, поддерживая его на заданной высоте.

При уменьшении отбора азотной флегмы из карманов конденсатора концентрация азота в ней повышается. Избыток азотной флегмы стекает в нижнюю часть колонны, и концентрация кислорода в кубовой жидкости понижается, а уровень жидкости в кубе возрастает. В данном случае кислородный дроссельный вентиль слегка открывают с тем, чтобы уровень жидкости в кубе перестал повышаться и достиг нормы.

Чем выше концентрация жидкого азота, поступающего в верхнюю колонну, тем больше концентрация отходящего из нее газообразного азота, т. е. тем меньше потери кислорода с отходящим азотом и тем выше степень извлечения кислорода из перерабатываемого воздуха. Однако это верно только в том случае, когда азотной флегмы достаточно для обеспечения процесса ректификации в верхней части верхней колонны. Поэтому для каждого аппарата необходимо установить оптимальное положение азотного дроссельного вентиля (отмечается в паспорте аппарата), при котором концентрация и отбор азотной флегмы обеспечивают максимальное извлечение кислорода из воздуха. Практически концентрацию жидкого азота в карманах конденсатора поддерживают всегда близкой к концентрации отходящего азота в верхней колонне.

Положения азотного и кислородного дроссельных вентилей нижней колонны взаимно связаны. Прикрытие кислородного вентиля не только уменьшает отбор кубовой жидкости, но и понижает содержание в ней кислорода в результате разбавления азотом, стекающим сверху. Это вызывает необходимость бо́льшего открытия азотного дроссельного вентиля для восстановления нормальных концентраций продуктов разделения. Нельзя допускать сильного понижения уровня жидкости в кубе, так как возможен прорыв паров из нижней колонны в верхнюю, что приведет к нарушению ее процесса ректификации.

Отбор продуктов разделения воздуха из верхней колонны и их концентрацию регулируют с помощью вентилей на линиях отбора кислорода и азота из блока разделения. При этом руководствуются следующим основным правилом, вытекающим из материального баланса процесса ректификации: чем выше концентрация отбираемого продукта, тем меньше выход и тем бо́льшее количество его примешивается к другому продукту. Например, при уменьшении количества отбираемого кислорода повышается его концентрация, но одновременно возрастает содержание кислорода в отходящем азоте, и наоборот.

Для увеличения отбора продукта необходимо открывать вентиль на трубе, по которой он отводится из воздухоразделительного аппарата, и одновременно прикрывать вентиль на трубе для отбора второго продукта.

Если концентрация кислорода ниже требуемой величины, необходимо несколько прикрыть вентиль на трубе отвода кислорода в газгольдер. При этом количество паров, поступающих из конденсатора в верхнюю колонну, увеличится и повысится степень очистки от азота жидкого кислорода, стекающего по тарелкам. При установившемся режиме ректификации количество паров кислорода, образующихся в конденсаторе, зависит только от тепловой нагрузки последнего, т. е. от количества азота, поступающего в конденсатор из нижней колонны. Если поверхность конденсатора достаточна, то он справляется с этой тепловой нагрузкой, вследствие чего уровень жидкости в нем и соответствующее давление в нижней колонне будут постоянными.

При установившемся режиме работы блока разделения воздуха давление в нижней колонне определяют факторы, перечисленные ниже.

*Давление в верхней колонне.* Для создания температурного напора в конденсаторе, обеспечивающего конденсацию паров азота, поступающих из нижней колонны, давление в нижней колонне должно превышать давление в верхней колонне не менее чем на 4—4,5 *кгс/см*$^2$.

*Концентрация кислорода в конденсаторе.* Чем выше концентрация кислорода, тем выше температура его кипения, следовательно, тем выше должно быть давление в нижней колонне для увеличения конденсации азота.

*Концентрация азота в парах.* Повышение концентрации азота сопровождается увеличением давления, необходимым для его кон-

денсации. Следовательно, требуется более высокое давление паров азота в нижней колонне.

*Уровень жидкого кислорода в конденсаторе.* При понижении уровня жидкого кислорода уменьшается поверхность теплообмена между жидким кислородом и конденсирующимися парами азота, поэтому требуется увеличение температурного напора в конденсаторе для передачи прежней тепловой нагрузки. Обеспечить это можно только повышением давления паров азота в нижней колонне.

Давление в нижней колонне может также возрасти вследствие скопления неоно-гелиевой смеси под крышкой конденсатора; эта смесь из-под крышки конденсатора следует отводить через соответствующий вентиль или диафрагму.

**Регулирование теплового режима.** Тепловой режим воздухоразделительной установки регулируют воздушным дроссельным вентилем. Увеличивая или уменьшая его открытие, изменяют давление воздуха перед блоком разделения, что в установках с циклом высокого давления и дросселированием воздуха является средством изменения холодопроизводительности цикла.

Изменение теплового баланса блока разделения при возрастании или уменьшении холодопотерь немедленно сказывается на изменении уровня жидкого кислорода в конденсаторе, поскольку уровень жидкости в кубе поддерживается постоянным. Понижение уровня кислорода в конденсаторе указывает на возрастание холодопотерь; для восстановления прежнего уровня необходимо повысить давление после компрессора. Повышение уровня жидкости в конденсаторе, наоборот, означает, что имеется избыток холода и давление воздуха в цикле должно быть снижено.

Нарушение установившегося теплового баланса блока разделения и вызываемое этим изменение уровня жидкого кислорода в конденсаторе влияют на концентрацию и количество получаемого кислорода. При возрастании уровня жидкости в конденсаторе уменьшается количество паров, поднимающихся в колонну, что при том же отборе газообразного кислорода из конденсатора приводит к снижению его концентрации. Для повышения концентрации до первоначальной необходимо уменьшить отбор продукта из газового пространства конденсатора. При понижении уровня жидкости в конденсаторе, наоборот, количество паров возрастает, концентрация кислорода в них повышается и отбор газообразного продукта приходится увеличивать.

Накопление жидкого кислорода в конденсаторе и последующий усиленный отбор его иногда используют для регулирования производительности аппарата при кратковременных изменениях потребления кислорода. Однако этот способ рекомендовать нельзя, так как при интенсивном выпаривании жидкого кислорода, накопленного в конденсаторе, возможно повышение концентрации в нем ацетилена и выпадение твердого ацетилена в конденсаторе, что представляет опасность. Кроме того, данный способ приводит



нарушению установившегося режима работы ректификационного аппарата и в конечном счете к повышению удельного расхода энергии.

Следует учесть, что если по характеру отклонений от нормального режима уровень жидкости в конденсаторе должен бы измениться, но это не фиксируется указателем уровня, то можно предполагать неисправность указателя уровня жидкости.

**Возможные нарушения нормального режима и способы их устранения.** Если теплый конец теплообменника расположен вверху и блок осушки воздуха работает неудовлетворительно, то при слишком частом прикрывании вентиля на трубе, отводящей кислород из аппарата, можно ускорить замерзание теплообменника и сократить рабочий период установки. Это происходит потому, что при уменьшении подачи кислорода через кислородную секцию теплообменника воздух охлаждается недостаточно, лед в верхней части теплообменника оттаивает и вода стекает вниз; попадая в более холодные части теплообменника, она замерзает в трубках, постепенно забивая их льдом. Особенно быстрое замерзание теплообменника при кратковременных остановках воздухоразделительного аппарата происходит в конце рабочей кампании, когда в теплообменнике уже накопилось большое количество льда.

Повышение уровня жидкости в кубе при неизменном или понижающемся уровне жидкости в конденсаторе является следствием закупорки кислородного дроссельного вентиля твердой $CO_2$. Для устранения закупорки вентиль необходимо «прошуровать», т. е. быстрым поворотом маховичка прикрыть его на мгновение полностью и вслед за этим так же быстро установить в прежнее положение. Если это не поможет, вентиль надо немного приоткрыть.

Иногда давление в нижней колонне становится неустойчивым и дроссельными вентилями его не удается поддерживать постоянным. При этом содержание кислорода в кубовой жидкости снижается. Такое явление объясняется нечеткой работой дроссельных вентилей вследствие забивки их твердой двуокисью углерода или износа резьбы. В этом случае вентили нужно «прошуровать»; одновременно следует проверить работу аппаратуры системы очистки воздуха от $CO_2$.

При износе резьбы вентиля ее следует (при очередном отогреве аппарата) исправить метчиком или сменить вентиль.

Дроссельный вентиль для кислорода иногда приходится «шуровать» примерно через каждые 3—4 *ч* для удаления твердой $CO_2$, отложившейся на резьбе и конусе шпинделя.

### 12.1.5. Отогрев и продувка воздухоразделительного аппарата

Различают полные, частичные и местные отогревы воздухоразделительного аппарата.

**Полный отогрев аппарата.** После некоторого времени работы воздухоразделительного аппарата в теплообменнике, холодных

коммуникациях и арматуре накапливаются лед и твердая двуоки углерода, которые сужают проход в трубках и вентилях. Увели ние разности давлений воздуха до и после теплообменника ука вает на то, что воздухоразделительный аппарат «замерз» и требу ся провести его отогрев и продувку.

На замерзание аппарата указывают и другие признаки: сни ние температуры отходящего азота и концентрации получаемо кислорода; закупорка воздушного и кислородного дроссельных ве тилей твердой двуокисью углерода. Не следует допускать перепа давления воздуха в теплообменниках установок, работающих по циклу высокого давления, свыше 60—80 *кгс/см*².

Подготовка к полному отогреву заключается в следующем:

1) не останавливая компрессор, снижают давление после не до 25 *кгс/см*²;

2) открывают продувочные вентили на масло-влагоотделител осушительных устройств;

3) сливают всю жидкость из куба, конденсатора и карман конденсатора, для чего открывают спускные вентили на щи управления аппарата;

4) закрывают все находящиеся на щите управления венти контроля и анализов;

5) пускают воздух через отогревательный коллектор аппарат

6) закрывают вентили — воздушный дроссельный и продуво ные, а вентиль на азотной трубе — открывают;

7) вывертывают шпиндели азотного и кислородного дроссел ных вентилей;

8) снимают манометры высокого давления, манометры средне и низкого давления оставляют на месте;

9) отъединяют нижнюю и верхнюю трубочки от указатель уровня жидкости.

Воздух для отогрева подается из компрессора через воздухон догреватель с электрическими нагревательными элементами. Это воздух можно не очищать от двуокиси углерода, а только про стить через блоки осушки, минуя декарбонизатор. Постепенно те пературу подаваемого воздуха повышают до 70—80 °С; (повыша температуру греющего воздуха следует медленно, не превыш предела 70—80 °С, резкое повышение температуры может вызва опасные тепловые деформации частей и деталей аппарата и появл ние пропусков).

При этом вставляют обратно шпиндели азотного и кислородно дроссельных вентилей и поворачивают их на несколько оборото Приблизительно за 30 *мин* до окончания отогрева вынимают шпи дель воздушного дроссельного вентиля. Отогрев аппарата продо жают до тех пор, пока температура воздуха, выходящего че азотную трубу, не достигнет 10—20 °С и из всех открытых вентиле и трубок аппарата не начнет выходить теплый воздух.

По окончании отогрева шпиндель воздушного дроссельного ве тиля ставят на место и вентиль закрывают. Затем закрывают в



вентили на линии отогрева и поднимают давление в компрессоре до 60—80 *кгс/см*² для продувки воздухоразделительного аппарата удаления влаги, скопившейся в нем во время оттаивания. Продувают последовательно, сначала трубки теплообменника, затем змеевик куба и корпус воздушного дроссельного вентиля. Окончив продувку, останавливают воздушный компрессор и подготавливают воздухоразделительный аппарат к пуску.

Частичные отогревы. Полный отогрев воздухоразделительного аппарата занимает довольно много времени. Между тем в установках раньше забиваются теплообменники, особенно при неудовлетворительной осушке и очистке воздуха от паров воды и двуокиси углерода. В этом случае производят частичный отогрев только забитого теплообменника, оставляя другие части воздухоразделительного аппарата охлажденными*. Воздухоразделительные аппараты обычно снабжаются устройством для проведения частичных отогревов (продолжительность их не превышает 1—1,5 *ч*).

Частичными отогревами можно продлить период работы воздухоразделительного аппарата между полными отогревами до 3000—4000 *ч*, т. е. значительно сократить потери времени на остановки. Осушенный воздух для частичного отогрева пропускают через подогреватель. Нагретый до 70—90 °С воздух через соответствующий вентиль коллектора отогрева подводится в межтрубное пространство азотной секции теплообменника и удаляется наружу через трубу для отвода азота.

Для ускорения отогрева часть теплого сжатого воздуха можно пропустить по трубкам теплообменника и выпустить через продувочный вентиль последнего. При этом следует закрыть вентили выпуска кислорода в газгольдер и в атмосферу, так как иначе испаряющийся в конденсаторе кислород будет проходить по кислородной секции теплообменника и охлаждать его, что удлинит процесс отогрева. Отогрев теплообменника продолжают до тех пор, пока выходящий из него воздух не будет иметь температуру 10—20 °С.

После отогрева теплообменник тщательно продувают для удаления влаги; для этого повышают давление в компрессоре. Трубки теплообменника продувают до тех пор, пока из продувочного вентиля не начнет выходить сухой воздух.

Частичный отогрев можно производить и в обратном порядке. Воздух после электроподогревателя разделяется на два потока. Один поток подается, как обычно, в азотную камеру теплообменника, а второй — в трубки теплообменника через продувочный вентиль. При этом воздух проходит теплообменник снизу вверх в направлении, обратном обычному движению воздуха в трубках. Для продувки после отогрева сжатый воздух подают в трубки через коллектор теплого конца теплообменника. Этим способом можно

* Это относится в основном к установкам выпуска прежних лет, с химической очисткой воздуха.

отогревать теплообменники, для которых частичный отогрев в обычном порядке затруднен или невозможен.

При пуске аппарата в работу после частичного отогрева необходимо несколько раз быстро открыть и закрыть воздушный дроссельный вентиль с целью продувки и удаления следов влаги, которые могут случайно остаться в трубке перед вентилем. Кислородный и азотный дроссельные вентили при частичном отогреве можно держать открытыми.

Отогрев одного из нескольких работающих в цехе воздухоразделительных аппаратов рекомендуется производить азотом, отходящим из остальных аппаратов, так как в этом случае не требуется осушать греющий газ. Азот нагревается в электронагревателе до той же температуры, что и воздух. Необходимое давление азота создается с помощью газодувки или компрессора низкого давления (этот компрессор низкого давления можно во время производственного периода использовать для поддува воздуха в основной воздушный компрессор высокого давления).

Частичный отогрев теплообменника можно также производить при подаче всего греющего воздуха не в межтрубное пространство, а в трубки теплообменника. Применение этого способа дает хорошие результаты, так как сухой теплый воздух не только выдувает, но и испаряет воду, насыщаясь ее парами. Вследствие этого значительно сокращается продолжительность отогрева и создаются условия для лучшей очистки теплообменника от влаги.

Горячий воздух подается через продувочный вентиль теплообменника, а использованный удаляется в атмосферу через продувочные вентили, устанавливаемые для этого на трубопроводе, по которому воздух высокого давления поступает в теплообменник. Указанным способом можно осуществить и полный отогрев воздухоразделительного аппарата.

В установках с нормально работающей адсорбционной осушкой воздуха влагосодержание его невелико, поэтому в теплообменнике лед заметно не накапливается. В этих установках надобность в частичном отогреве теплообменника обычно не возникает.

Частичному отогреву периодически подвергают также следующие аппараты установок.

*Адсорберы ацетилена.* Перед отогревом работавшего ранее адсорбера поток кубовой жидкости постепенно переключают на второй (параллельный) адсорбер. Жидкость из работавшего аппарата постепенно передавливают обратно в нижнюю колонну, для чего вентиль на трубе выхода жидкости из адсорбера закрывают, а вентиль на линии ввода жидкости в адсорбер оставляют открытым. Вследствие частичного испарения жидкости в адсорбере давление в нем повышается и жидкость из него переходит в нижнюю колонну, а затем поступает в верхнюю колонну через второй, вновь включенный адсорбер.

Затем закрывают на отключенном адсорбере входной вентиль и одновременно открывают продувочный вентиль для выпуска газа



После этого производят его отогрев и продувку греющим азотом. Применение воздуха для отогрева адсорбера не рекомендуется из-за опасности загрязнения адсорбента маслом.

Если в установке имеется только один адсорбер, то на время его отогрева, продувки и регенерации силикагеля выработку кислорода на аппарате прекращают, а вентили на линиях подачи кубовой жидкости в верхнюю колонну полностью закрывают, с тем чтобы в верхнюю колонну не мог поступить неочищенный от ацетилена жидкий воздух.

*Фильтры двуокиси углерода.* Переключение, отогрев и продувку фильтров производят в том же порядке, что и адсорберов ацетилена.

*Детандерные фильтры.* Фильтры для очистки детандерного воздуха отогревают и продувают сжатым воздухом в сроки, установленные инструкцией по эксплуатации.

*Отдельные теплообменники блока разделения.* Их подвергают отогреву и продувке сжатым подогретым воздухом или азотом, который подводится по специальным коммуникациям для периодического отогрева этих аппаратов во время рабочей кампании.

**Местные отогревы.** Влага в воздухоразделительном аппарате может накапливаться не только в теплообменнике, но и в других частях аппарата. В этих случаях можно производить местные отогревы, при которых весь аппарат остается охлажденным, а отогреваются лишь трубки или вентили, забитые льдом. Местному отогреву подвергают следующие части воздухоразделительного аппарата.

Трубопровод воздуха высокого давления. В трубопровод высокого давления перед воздушным дроссельным вентилем иногда попадает влага из теплообменника при его частичном отогреве. После нескольких отогревов теплообменника трубопровод может оказаться забитым льдом. В таких случаях производят местный его отогрев.

Жидкость из нижней колонны сливают или передавливают через адсорбер в верхнюю колонну, открывают все продувочные и анализные вентили нижней колонны, закрывают кислородный и азотный дроссельные вентили и вынимают шпиндель воздушного дроссельного вентиля.

Затем пускают воздушный компрессор и устанавливают давление сжатия воздуха 20 *кгс/см*². На патрубок воздухоподогревателя надевают резиновый шланг, по которому часть воздуха высокого давления пропускается через подогреватель, а остальная часть выпускается в атмосферу через продувочные вентили. Второй конец шланга вставляют в корпус воздушного дроссельного вентиля на место шпинделя. Нагретый воздух подают в вентиль с перерывами, присоединяя и отсоединяя шланг, для того, чтобы отогрев вентиля и трубопровода происходил постепенно и воздух мог выходить обратно.

Собственно процесс отогрева занимает 15—20 *мин.* По окончании отогрева шпиндель воздушного дроссельного вентиля вставля-

ют обратно и восстанавливают режим работы воздухоразделите-
ного аппарата.

Клапаны воздушного и кислородного дро-
сельных вентилей. Клапаны примерзают вследствие попа-
ния на них двуокиси углерода или влаги. Для устранения приме-
зания клапанов их отогревают. Вначале подготавливают венти-
для отогрева, как описано выше. Затем снимают сальник венти-
и надевают на шпиндель резиновый шланг; теплый воздух по шла-
гу проходит через сальниковую камеру между шпинделем и кор-
сом вентиля и отогревает его. Через каждые 10—15 *сек* кон-
шланга отводят назад, для того чтобы охлажденный воздух вы-
дил наружу. Спустя 5—10 *мин* прогретый шпиндель вывертыва-
и воздух высокого давления пускают по обычному пути через те-
лообменник; при этом дроссельный вентиль продувают.

Тарелки нижней колонны. Иногда тарелки забива-
ся твердой двуокисью углерода. При этом нарушается процесс ре-
тификации, а жидкость может зависнуть в колонне. В этих случа-
производят местный отогрев. Из нижней колонны сливают жи-
кость, закрывают воздушный и азотный дроссельные вентили
вывертывают шпиндель кислородного дроссельного вентиля. Нагр-
тый воздух подают через отверстие кислородного дроссельного ве-
тиля и следят за тем, чтобы избыточное давление в нижней колон-
не превышало 5—6 *кгс/см*². Отогрев прекращают, когда из отве-
стий всех продувочных и анализных вентилей нижней колонны н-
чинает выходить сухой воздух с температурой 10—20 °С.

Продолжительность пускового периода воздухоразделительно-
аппарата после отогрева тем больше, чем сильнее он был прогр-
поэтому частичные и местные отогревы, при которых отдельн-
части аппарата остаются охлажденными, сокращают последующ-
пусковой период и уменьшают простои. Этим увеличивается коэ-
фициент полезного использования оборудования.

Продолжительность местного отогрева (включая время на по-
готовку) для аппаратов производительностью до 200 *м*³/*ч* в сре-
нем равна (в *мин*):

| | |
|---|---|
| Трубопроводы высокого давления . . . . . | 90 |
| Воздушный или кислородный дроссельный вентиль | 45 |
| Нижняя колонна . . . . . | 90 |

### 12.1.6. Остановка воздухоразделительного аппарата

При необходимости остановки воздухоразделительного аппара-
поступают следующим образом. Останавливают воздушный ко-
прессор, затем закрывают воздушный дроссельный вентиль на щи-
управления и вентиль для отвода кислорода в газгольдер; однов-
менно открывают вентиль для вывода кислорода в атмосфер-
Дроссельные вентили для азота и кислорода при кратковремен-
остановках можно оставлять открытыми.



При длительных остановках (несколько часов) кислородный
оссельный вентиль закрывают во избежание передавливания всей
бовой жидкости в верхнюю колонну и для облегчения последую-
го пуска аппарата. Если остановка аппарата длится не более
1,5 *ч*, его пускают вновь, предварительно продув теплообменник;
ление воздуха держат несколько повышенным в зависимости от
овня жидкости в конденсаторе.

После того как концентрация отходящего кислорода достигнет
,5—99,7%, можно направить кислород в газгольдер, открыв вен-
ль на кислородной трубе и одновременно закрыв вентиль на тру-
для выпуска кислорода в атмосферу.

При каждой остановке аппарата жидкость из нижней и верхней
лонн сливается самотеком по тарелкам в куб и конденсатор,
е ее уровень повышается против нормального. Не следует допу-
ить переполнения жидкостью конденсатора; избыток ее при пол-
стью заполненном конденсаторе сливают в стационарную, спе-
иально выделяемую емкость.

Остановка воздухоразделительного аппарата вызывает испаре-
е жидкости в кубе и конденсаторе, что создает условия для по-
шения концентрации ацетилена в жидкости, если он содержался
перерабатываемом воздухе и проникал в растворенном виде в
нденсатор вместе с кубовой жидкостью из нижней колонны.
следствие этого может произойти выделение и накопление ацети-
на в твердом виде в испарителе и конденсаторе. Это особенно
асно, когда в испарителе и конденсаторе остается мало жидко-
и. Поэтому во время перерыва в работе воздухоразделительного
парата необходимо вести регулярный контроль за содержанием
етилена в жидкости из куба и конденсатора (см. гл. 14).

### 12.1.7. Зависание жидкости в колоннах

В практике эксплуатации воздухоразделительных аппаратов
ают случаи зависания жидкости в нижней и верхней ректифи-
ционных колоннах.

Признаки зависания жидкости в нижней ко-
онне: уровень жидкости в конденсаторе понижается и стано-
тся неустойчивым; сопротивление колонны и давление в ней
растают; снижается и не поддается регулированию концентра-
ия азота в карманах конденсатора; снижается концентрация от-
дящего азота, а концентрация отходящего кислорода становится
устойчивой; при открывании вентиля для продувки неоно-гелие-
й смеси вытекает жидкость; снижается расход воздуха низкого
авления.

Признаки зависания жидкости в верхней ко-
онне: уровень жидкости в конденсаторе понижается и становится
устойчивым; сопротивление колонны возрастает; давление в ко-
онне падает, особенно в момент переключения регенераторов; кон-
центрация азота в карманах уменьшается, но может быть восста-

новлена путем регулирования; содержание кислорода в кубо жидкости снижается; концентрация отходящего азота падает, концентрация получаемого кислорода становится неустойчив появляется жидкость из вентиля для отогрева теплообменника и вентиля продувки клапанных коробок регенераторов; пределы колебаний расхода воздуха низкого давления при переключе регенераторов сильно увеличиваются.

Причины зависания жидкости. Основной причи зависания жидкости в ректификационных колоннах является пов шение гидравлического сопротивления тарелки более величины р полагаемого напора жидкости в переливном устройстве таре Сопротивление сливу жидкости с тарелки может возрасти вле вие слишком большой скорости паров в колонне, коррозии загрязнения (отложениями льда, $CO_2$ и масла) отверстий тар или переливного устройства, сужения прохода для жидкости в реливном устройстве, неправильного регулирования проц ректификации и перегрузки колонны.

Предупреждение зависания жидкости. М борьбы с зависанием следующие: временное уменьшение на 30% подачи воздуха в аппарат; полный отогрев и продувка во хоразделительного аппарата; промывка колонны; уменьшение к чества жидкости, поступающей на орошение тарелок колонн количества паров, поднимающихся по тарелкам, путем уменьш степени открытия соответствующих вентилей.

Зависание, вызванное засорением тарелок твердой двуок углерода, иногда можно устранить промывкой тарелок фле Для этого прекращают подачу воздуха и в воздухоразделител аппарат, дают возможность жидкости стечь с тарелок в куб ней колонны и конденсатор, после чего через 20—25 *мин* в пускают аппарат. Если этот способ не дает результатов, сл произвести полный отогрев воздухоразделительного аппарата.

### 12.1.8. Проверка герметичности воздухоразделительного аппарата

Перед испытанием воздухоразделительного аппарата на г тичность его полностью отогревают и продувают; затем осма вают и притирают все вентили, в том числе дроссельные, а та предохранительные клапаны. Проверку на герметичность начин с трубок теплообменника, затем проверяют нижнюю колон конденсатором и испарителем и, наконец, верхнюю колонну.

Для испытания трубок теплообменника закрывают расп тельные вентили, открывают вентили для выпуска кислорода и та и пускают в ход воздушный компрессор. Когда давление в лообменнике достигнет величины рабочего давления, вентил воздухоподводящей трубе высокого давления закрывают, комп сор останавливают, открывают продувочные вентили и снижают давление в магистрали высокого давления до атмосферного.



Если давление в теплообменнике в течение 1 *ч* снизится не более на 2% первоначальной величины, можно считать, что трубки лообменника достаточно герметичны. В противном случае сле т найти и устранить пропуски.

Пропуски во фланцах, запорном воздушном вентиле и продувоч вентилях определяют обмазкой мыльной водой; пропуск в ссельном воздушном вентиле или змеевике испарителя вызывает личение давления в нижней колонне.

Кроме того, пропускание в трубках теплообменника можно об ужить по повышению давления в верхней колонне, если при этом тили для отвода кислорода и азота закрыты. Для устранения ерметичности трубок вскрывают коллектор и испытывают каж трубку в отдельности. Неисправную трубку заглушают, ставя боих концов ее медные пробки на мягком припое. Допускает заглушать не более 15% всех трубок теплообменника.

Герметичность нижней колонны проверяют, закрыв азотный и слородный дроссельные вентили и повысив через воздушный оссельный вентиль избыточное давление в колонне до 6 *кгс/см*². осле этого вентиль закрывают. Герметичность считается удовлет рительной, если давление снизится не больше чем на 0,2 *кгс/см*² течение 1 *ч*. Рост давления в верхней колонне при испытании жней колонны указывает на пропуски в трубках или крышке иденсатора и в азотном или кислородном дроссельных вентилях.

Герметичность верхней колонны проверяют, закрыв вентили вы ска кислорода и азота, вентили для отогрева верхней колонны и одувки конденсатора, а также кислородный и азотный дроссель е вентили. Избыточное давление в верхней колонне поднимают 0,7 *кгс/см*², подавая в нее воздух из нижней колонны через отный или кислородный дроссельные вентили. Если в течение и давление в колонне упадет не более чем на 0,1 *кгс/см*², герме чность ее считается удовлетворительной.

Выше подробно рассмотрен технологический процесс получе и газообразного кислорода на примере наиболее простой уста вки, работающей по циклу высокого давления. В установках более сложной технологической схемой используются холодиль е циклы низкого и высокого давлений, применяются поршневые тандеры, турбодетандеры, регенераторы, кислородные насосы и угое дополнительное оборудование, что вносит ряд особенностей процессы пуска и обслуживания таких установок. Эти особенно и рассматриваются более кратко, так как основные принципы гулирования процесса в воздухоразделительном аппарате оста тся такими же, как для установок высокого давления.

## 12.2. ПОЛУЧЕНИЕ ЖИДКОГО КИСЛОРОДА И ЖИДКОГО АЗОТА НА УСТАНОВКАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Основными показателями технологического режима установок и получения жидкого кислорода и жидкого азота являются авление воздуха перед детандером и температура воздуха до и

после него. В зависимости от температуры воздуха перед детандером давление перед ним и температура после него характеризуются следующими данными:

| | | |
|---|---|---|
| Температура перед детандером, °С | 20—30 | —35 |
| Избыточное давление перед детандером, *кгс/см*² | 200—215 | 160 |
| Температура после детандера, °С | От —110 до —120 | От —160 до [illegible] |

Остальные показатели технологического процесса получения жидкого кислорода остаются в основном такими же, как и газообразного. Подготовка к пуску и пуск воздухоразделительного аппарата для получения жидкого кислорода производятся в том же порядке, как и аппарата, производящего газообразный кислород.

Вследствие высокой холодопроизводительности цикла с детандером охлаждение блока разделения и накопление в нем жидкости происходят значительно быстрее, чем в установках для получения газообразных продуктов разделения, работающих без детандера. Продолжительность периода пуска обычно не более 3—5 *ч*.

Наладка процесса ректификации в верхней колонне и его регулирование отличаются несколько от такового на газообразных установках, так как в данном случае отбор продуктов разделения в жидком виде влияет не только на процесс ректификации, но и на тепловой баланс установки в целом. Максимальное количество отводимого жидкого продукта здесь определяется холодопроизводительностью цикла.

Принятое распределение воздуха между детандером и дроссельным вентилем, установленное в конце пускового периода, в последующем почти не подвергается изменению.

Приблизительно через 1,5—2 *ч* после начала работы детандера указатель уровня нижней колонны фиксирует появление жидкости в кубе. Уровень ее будет постепенно повышаться и при нормальной работе остановится примерно на высоте 10—15 *см* по шкале указателя. После этого жидкость, накапливающаяся в кубе, должна передаваться в верхнюю колонну через кислородный дроссельный вентиль и адсорбер ацетилена. Через 1—1,5 *ч* после появления жидкости в кубе второй указатель отметит появление жидкости в конденсаторе. После этого начинают прикрывать дроссельные вентили для кислорода и азота, постепенно устанавливая их в положение, предусмотренное для данного аппарата. Дальнейшее регулирование процесса ведут в соответствии с результатами анализа отходящего азота и жидкого кислорода. Когда концентрация кислорода достигнет 99,5—99,7% и указатель уровня начнет показывать увеличение количества жидкости в конденсаторе, постепенно, в течение 1—1,5 *ч* переходят на слив жидкого кислорода из конденсатора в стационарную емкость; при этом необходимо поддерживать требуемую концентрацию получаемого кислорода. Вентиль для отвода кислорода в газгольдер* открывают лишь частично для отбора из воздухоразделительного аппарата того количества кислорода, которое получается в газообразном виде, и для поддержания концентрации отходящего азота не ниже 98%, а газообразного кислорода — не ниже 99,5—99,7%.



Слив получаемого жидкого кислорода в стационарную емкость можно производить непрерывно или периодически, по мере накапливания его в конденсаторе. Конденсатор должен быть наполнен жидкостью до определенной высоты, указанной в протоколе заводского испытания воздухоразделительного аппарата.

Концентрацию получаемого жидкого кислорода в установках с детандером регулируют изменением холодопроизводительности детандера. Повышение концентрации жидкого кислорода в конденсаторе при одновременном понижении концентрации отходящего азота указывает на недостаточную холодопроизводительность цикла. Бо́льшая часть кислорода уходит в виде паров вместе с азотом и понижает его концентрацию. В этом случае следует увеличить подачу воздуха высокого давления в цилиндр детандера, что достигается увеличением хода отсечки наполнения цилиндра детандера. Это следует производить постепенно, так как иначе концентрация кислорода в конденсаторе может снизиться слишком быстро.

Понижение (против нормального) концентрации жидкого кислорода в конденсаторе можно устранить, снижая холодопроизводительность цикла путем уменьшения подачи воздуха в цилиндр детандера.

В установках, в которых осушка воздуха производится вымораживанием влаги в переключаемых теплообменниках с предварительной конденсацией основного количества влаги в теплообменнике-ожижителе, необходимо в режиме установившегося процесса поддерживать температуру воздуха высокого давления после ожижителя в пределах 4—5 °С, регулируя заслонками распределение между теплообменниками потоков отходящего азота. Понижение температуры воздуха после ожижителя ниже 4 °С может вызвать образование льда на стенках его трубок. При регулировании нужно следить за тем, чтобы избыточное давление в верхней колонне не превышало 0,6 *кгс/см*².

Продувку ожижителя для удаления влаги производят каждые 20—30 *мин*. Разность температур воздуха и азота на теплом конце ожижителя должна составлять 1,5—2°. В трубках основного теплообменника допускается перепад давления не более 10 *кгс/см*², после чего производят отогрев теплообменника и продувку его подогретым азотом, подаваемым из подогревателя в коллектор для отогрева.

**Получение жидкого кислорода.** Рассмотрим в качестве примера схему пуска установки КЖ-1 для получения жидкого кислорода (рис. 12.2), которая включает три этапа.

Первый этап. Путь воздуха при охлаждении блока разделения показан на рис. 12.2 сплошной линией. Давление при пуске максимальное, равное 180—200 *кгс/см*². Воздух проходит сначала

* Этот вентиль имеется только на воздухоразделительных аппаратах для производства как жидкого, так и газообразного кислорода, снабженных теплообменником с кислородной секцией.

теплообменник *15*. В детандеры подается максимальное количество воздуха, которое они могут пропустить. Остаток воздуха пропускается через теплообменник *2* и дроссельный вентиль *3*. После детандеров воздух подается в нижнюю колонну *4* через детандерные фильтры *1*.

Из нижней колонны основное количество воздуха по пусковой байпасной линии перепускается в трубопровод отходящего азота и затем в межтрубное пространство переохладителей *12* и *5* и теплообменников *2* и *15*, что ускоряет их охлаждение. Часть воздуха обратного потока отводится в предварительный теплообменник *15* из середины основного теплообменника *2* через заслонку *16*. Меньшая часть детандерного воздуха проходит нижнюю колонну *4* снизу вверх по тарелкам и через дроссельный вентиль *11* поступает в верхнюю колонну *14*, а затем присоединяется к общему обратному потоку в линии отбросного азота. После предварительного теплообменника *15* воздух выбрасывается в атмосферу.

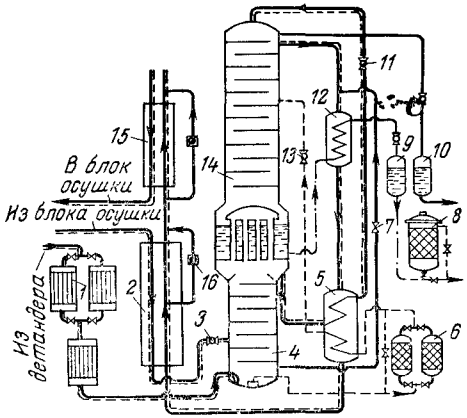



Рис. 12.2. Схема потоков при пуске установки КЖ-1:

*1* — детандерные фильтры; *2* — основной теплообменник; *3* — воздушный дроссельный вентиль; *4* — нижняя колонна; *5* — переохладитель жидкого азота и кубовой жидкости; *6* — адсорберы ацетилена; *7* — байпасный вентиль; *8* — фильтр жидкого кислорода; *9* — мерник жидкого кислорода; *10* — мерник жидкого азота; *11* — азотный дроссельный вентиль; *12* — переохладитель жидкого кислорода; *13* — дроссельный вентиль кубовой жидкости; *14* — верхняя колонна; *15* — предварительный теплообменник; *16* — заслонка на линии отбросного азота из середины основного теплообменника.

При температуре воздуха на теплом конце теплообменника *15*, 3—5 °С и разности температур 5—6 *град*, часть воздуха после блока осушки направляется в теплообменник *2* и через дроссельный вентиль *3* подается в середину нижней колонны. Задвижку *16* закрывают. Через некоторое время этот воздух начинает сжижаться.

Распределение воздуха между детандером и дроссельным вентилем на этом этапе пуска регулируют по разности температур на теплом конце теплообменника *2* и температуре воздуха на выходе из теплообменника *15*. В конце первого этапа пуска байпасный вентиль *7* постепенно закрывают, следя за тем, чтобы давление в нижней колонне возрастало медленно.

Второй этап. Накопление жидкости происходит так же, как и при пуске установок газообразного кислорода, но значительно быстрее. Путь воздуха на рис. 12.2 обозначен пунктиром. Регулирование нагрузки детандеров производится аналогично первому этапу.



Третий этап. При налаживании режима ректификации и переходе к нормальному процессу воздух проходит в том же направлении, что и на втором этапе пуска. Сначала регулируют процесс ректификации в нижней колонне аналогично тому, как это делается в установках газообразного кислорода. После накопления нормального количества жидкости в конденсаторе и получения нормальных концентраций продуктов разделения в нижней колонне, давление в которой становится близким к нормальному, приступают к регулированию концентрации жидкого кислорода.

Для повышения концентрации жидкого кислорода уменьшают холодопроизводительность цикла, снижая наполнение детандера или рабочее давление воздуха перед ним. После достижения заданной концентрации жидкого кислорода в конденсаторе в нем поддерживают постоянный уровень, изменяя количество жидкого кислорода, сливаемого в емкость.

Состав продуктов разделения и производительность установки регулируют только изменением холодопроизводительности цикла, соответственно распределяя воздух между детандером и дросселем.

Если установка снабжена аппаратурой для повторной конденсации кислорода (с целью устранения запаха масла), то эту аппаратуру включают в самом конце пуска, после наладки процесса ректификации и установления заданной концентрации продукционного жидкого кислорода. Для этого сначала включают отбор газообразного азота и жидкого кислорода в добавочный конденсатор. Когда уровень жидкости в основном конденсаторе достигнет 60—70 *см*, начинают отбор газообразного кислорода в добавочный конденсатор, постепенно включая его в работу.

**Получение жидкого азота.** Пуск и наладку установок для получения жидкого азота производят в описанном выше порядке. Отличие состоит лишь в том, что установки жидкого азота не имеют колонны низкого давления (верхней) и в них отсутствуют пусковые (байпасные) линии для предварительного охлаждения теплообменников детандерным воздухом. Поскольку наладку режима ректификации приходится производить только в одной колонне, весь процесс пуска протекает быстрее.

Для подачи жидкости в межтрубное пространство конденсатора используют при пуске обводные линии адсорберов ацетилена, применяя (для защиты от накопления ацетилена в конденсаторе в этот период) слив первой порции жидкости и регулярные анализы ее на содержание ацетилена. При пуске установки жидкого азота ЖА-1 (в отличие от других установок жидкого азота) производят с самого начала отбор газа из-под крышки конденсатора для охлаждения этим газом второго основного и второго предварительного теплообменников.

Перейдем теперь к рассмотрению особенностей процесса получения газообразного кислорода на установках среднего давления, работающих по циклу с поршневым детандером, а также на установках, использующих жидкостный кислородный насос.

## 12.3. ПОЛУЧЕНИЕ КИСЛОРОДА НА УСТАНОВКАХ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Основные принципы регулирования технологического проце в установках с поршневым детандером, работающих с использо нием холодильного цикла среднего давления, остаются теми ж что и для установок с циклом высокого давления. Однако налич в этих установках детандера и нескольких секций теплообменник обусловливает некоторые особенности обслуживания.

В установившемся режиме получения газообразного кислоро технологический процесс характеризуется следующими основны показателями:

| | |
|---|---|
| Избыточное давление воздуха, *кгс/см²* | |
| перед теплообменниками | 30—33 |
| в нижней колонне | 5 |
| в верхней колонне | 0,4 |
| Температура воздуха, °С | |
| перед детандером | От —45 до —50 |
| после детандера | От —100 до —105 |
| перед дроссельным вентилем | —145 |
| Разность температур на теплом конце теплообменника, *град* | 8—9 |
| Содержание, % | |
| кислорода в кубовой жидкости | 38—39 |
| азота в жидкости из карманов конденсатора | 97—98 |
| Концентрация, % | |
| отходящего кислорода | 99,5—99,7 |
| отходящего азота | 97—98 |
| Избыточное давление воздуха перед теплообменниками при пуске установки, *кгс/см²* | 50 |

**Пуск установки.** Пуск установки (рис. 12.3) начинается с вкл чения компрессора. Перед пуском надо открыть: вентиль для хода воздуха из детандера, азотный дроссельный вентиль *3* и в тиль для выпуска азота в атмосферу.

После пуска компрессора включают в работу скруббер и б осушки воздуха или блок комплексной очистки воздуха. За пускают детандер *1* и устанавливают максимальную подачу воз ха в него. Для этого, как только избыточное давление воздуха ред детандером достигнет 40 *кгс/см²*, открывают вентиль вв воздуха в детандер. Если поршень уплотнен металлическими ко цами, смазываемыми маслом, пуск воздуха в детандер произво одновременно с пуском его электродвигателя (генератора).

Охлажденный в детандере воздух направляется в нижнюю лонну *8*, затем в верхнюю колонну *4* и теплообменник *2* и тем мым охлаждает новые порции воздуха, поступающего в детанде

* В установках с отбором аргонной фракции (например, АКГСН-960), назначенных для одновременного получения чистых кислорода и азота, об ный поток подается одновременно во все три секции теплообменника. Посту ние воздуха высокого давления в каждую секцию регулируют так, чтобы тем ратура на выходе всех потоков была примерно одинаковой.

Для ускорения получения чистых кислорода и азота в начале пуска уста ки отбор аргонной фракции увеличивают.



остепенно давление воздуха перед детандером повышают до 0 *кгс/см²* и часть воздуха высокого давления пропускают в нижнюю колонну *8* через воздушный дроссельный вентиль *10*.

Давление 50 *кгс/см²* держат до тех пор, пока воздушный дросельный вентиль открыт на $^1/_4$ оборота. После того как поступающий воздух достаточно охладится и поддерживать указанное давление станет трудно, начинают постепенно уменьшать наполнение цилиндра детандера. Одновременно полностью открывают вентиль на трубе для выпуска кислорода в атмосферу и немного приоткрывают воздушный дроссельный вентиль.

Когда уровень жидкости в кубе *9* колонны поднимется до 10—14 *см*, его постоянно поддерживают в этих пределах путем открытия кислородного дроссельного вентиля *6*. Передачу жидкости из куба *9* нижней колонны в верхнюю осуществляют только через адсорбер *7* ацетилена. При появлении жидкости в конденсаторе *5* вентиль отбора кислорода из воздухоразделительного аппарата и вентиль выпуска кислорода в атмосферу полностью открывают.

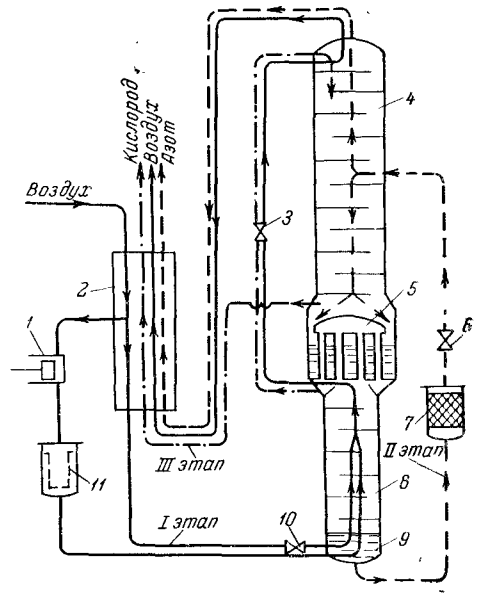



Рис. 12.3 Схема потоков при пуске установки с детандером:

*1* — детандер; *2* — теплообменник; *3* — азотный дроссельный вентиль; *4* — верхняя колонна; *5* — конденсатор; *6* — кислородный дроссельный вентиль; *7* — адсорбер ацетилена; *8* — нижняя колонна; *9* — куб нижней колонны; *10* — воздушный дроссельный вентиль; *11* — детандерный фильтр.

Когда уровень жидкости в конденсаторе достигнет 35—0 *см*, постепенно открывают воздушный дроссельный вентиль *10* для понижения давления воздуха после компрессора до 30 *кгс/см²*. Соответственно температура воздуха, выходящего из теплообменника, понижается до минус 145 °С, а количество жидкости в кубе увеличивается. Эту жидкость перепускают через адсорбер ацетилена в верхнюю колонну, используя кислородный дроссельный вентиль. Во избежание возрастания избыточного давления в нижней колонне свыше 5 *кгс/см²* необходимо при этом открыть азотный дроссельный вентиль. Одновременно уровень жидкости в кубе нижней колонны поддерживают постоянным.

После установления нормального режима ректификации (что определяют по анализам концентраций продуктов разделения) начинают отбор газообразного кислорода из конденсатора. Вначале анализы проводят чаще и отбирают небольшое количество

кислорода из конденсатора. Постепенно отбор кислорода увеличивают и доводят до нормальной величины, установленной для данного аппарата; при этом следят за тем, чтобы концентрация кислорода не снижалась. Период охлаждения и пуска установки обычно продолжается 6—8 *ч*.

**Обслуживание установки во время работы.** Обслуживание во время работы заключается в поддержании постоянного уровня жидкости в конденсаторе и кубе нижней колонны, установленного состава жидкости в кубе и в карманах конденсатора, а также в проверке концентрации продуктов разделения — кислорода и азота.

Давление воздуха перед детандером и воздухоразделительным аппаратом регулируют воздушным дроссельным вентилем. При понижении уровня жидкости в конденсаторе увеличивают давление воздуха, для чего прикрывают воздушный дроссельный вентиль; при повышении уровня вентиль открывают. Если детандер снабжен устройством для изменения степени наполнения, им также регулируют холодопроизводительность детандера.

Уровень жидкости в кубе нижней колонны регулируют открытием кислородного дроссельного вентиля, концентрацию азота в карманах конденсатора — открытием азотного дроссельного вентиля. Концентрацию отходящего азота и кислорода регулируют открытием соответствующих (азотного и кислородного) вентилей для отвода этих продуктов из воздухоразделительного аппарата.

**Особенности регулирования установок с детандером.** Холодопроизводительность в этих установках регулируют правильным распределением воздуха между детандером и теплообменником с помощью воздушного дроссельного вентиля. В установках для получения газообразного кислорода это дает возможность работать при минимальном давлении воздуха, а в установках для получения жидкого кислорода — получать при данном давлении максимальное количество жидкого кислорода заданной концентрации. Распределение воздуха контролируют по температуре воздуха перед детандером и по температуре отходящих продуктов разделения на теплом конце теплообменника; они должны соответствовать значениям, указанным в рабочей инструкции для данной установки.

С уменьшением поступления воздуха в детандер увеличивается поток воздуха, проходящий через дроссельный вентиль. При этом температура сжатого воздуха, прошедшего теплообменник, возрастает и средняя разность температур в теплообменнике увеличивается. Вследствие этого обратный поток может нагреться в теплообменнике до более высокой температуры, что приведет к повышению температуры перед детандером. Рост холодопроизводительности на 1 *кг* воздуха в детандере и некоторое уменьшение недорекуперации не могут компенсировать то понижение общей холодопроизводительности, которое происходит вследствие уменьшения поступления воздуха в детандер.

С увеличением поступления воздуха в детандер, т. е. при уменьшении потока воздуха через дроссельный вентиль, указанные явления протекают в обратном направлении, т. е. температура воздуха после теплообменника и температура обратного потока на выходе из теплообменника понижаются, что приводит к снижению температуры воздуха перед детандером. Несмотря на увеличение количества воздуха, проходящего через детандер, холодопроизводительность установки уменьшается, так как снижается удельная холодопроизводительность на 1 *кг* воздуха, расширяющегося в детандере, и увеличивается недорекуперация.

Указанные особенности регулирования холодопроизводительности цикла установки с детандером следует учитывать также при пуске установки. Режим пуска должен соответствовать максимальной холодопроизводительности цикла для быстрого охлаждения аппарата до рабочих температур.

## 12.4. ПОЛУЧЕНИЕ КИСЛОРОДА НА УСТАНОВКАХ С КИСЛОРОДНЫМ НАСОСОМ

В установках с кислородным насосом отбор кислорода из воздухоразделительного аппарата и, следовательно, концентрация его определяются производительностью насоса. С повышением производительности последнего увеличивается отбор кислорода из воздухоразделительного аппарата, что приводит к снижению чистоты получаемого продукта.

Пуск и обслуживание установки с кислородным насосом, а также наладка и регулирование ее режима в основном производятся в той же последовательности и теми же приемами, что и установок без насоса. Схема потоков при пуске установки высокого давления с насосом показана на рис. 12.4. Вентили на линии отвода кислорода должны быть открыты для охлаждения насоса *1* и кислородной трубки теплообменника *2* потоком газа, отходящего из колонны. Насос пускают после того, как воздухоразделительный аппарат будет полностью охлажден и в нем накопится достаточное количество жидкости, а также установится режим ректификации. Вначале насос включают с наименьшей нагрузкой (по отбираемому кислороду), а затем нагрузку постепенно увеличивают до нормальной.

Во время работы насоса необходимо обеспечить достаточное переохлаждение поступающего в него жидкого кислорода, для того чтобы клапаны насоса работали достаточно четко и их действие не нарушалось из-за вскипания жидкости при поступлении ее в цилиндр насоса.

Процесс ректификации в верхней колонне регулируют изменением производительности насоса, поскольку количество отходящего азота в данных установках определяется количеством кислорода, поступающего в насос. Изменение положения азотного вентиля влияет только на давление в верхней колонне. Это давление должно поддерживаться наименьшим для создания наилучших условий ректификации в верхней колонне и достаточным для подачи необходимого количества азота в блок осушки при регенерации адсорбента.

В начале наполнения очередной партии баллонов кислорода давление в теплообменнике будет минимально, благодаря чему уменьшаются потери холода и, следовательно уровень жидкости в конденсаторе несколько повышается. К концу наполнения баллонов давление возрастает до 150—165 *кгс/см²*, а потери холода увеличиваются, что приводит к некоторому снижению уровня жидкости в конденсаторе. Указанные изменения уровня жидкости в конденсаторе не влияют на режим работы аппарата и не требуют для их компенсации изменения давления поступающего в аппарат воздуха.

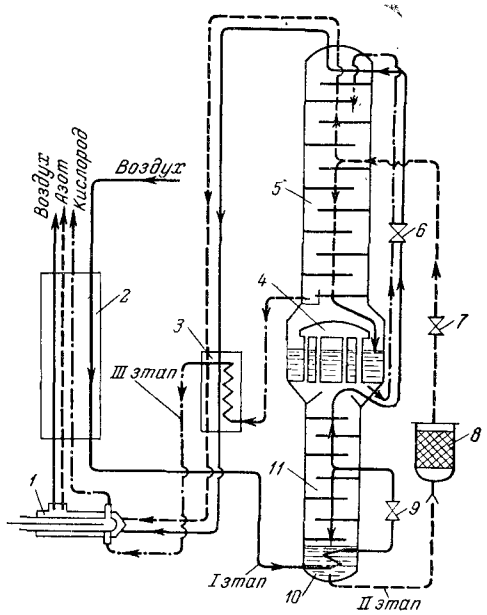



Рис. 12.4. Схема потоков при пуске установки с насосом:

*1* — кислородный насос; *2* — теплообменник; *3* — переохладитель жидкого кислорода; *4* — конденсатор; *5* — верхняя колонна; *6* — азотный дроссельный вентиль; *7* — кислородный дроссельный вентиль; *8* — адсорбер ацетилена; *9* — воздушный дроссельный вентиль; *10* — куб нижней колонны; *11* — нижняя колонна.

Для нормальной работы насоса необходимо своевременно подтягивать гайки сальника и заменять набивку в нем, чтобы не допускать пропусков кислорода через сальник. Необходимо также следить за работой клапанов насоса. Пропуски в сальнике и клапанах, нечеткая работа клапанов, вскипание жидкости в цилиндре насоса уменьшают производительность установки по кислороду. Избыток кислорода при этом поступает в отходящий азот и снижает его концентрацию.

В установках с кислородным насосом потери холода увеличиваются вследствие дополнительных потерь, вызванных работой насоса (см. гл. 4), поэтому рабочее давление в них поддерживается более высоким, чем в установках без насоса.

## 12.5. ПОЛУЧЕНИЕ КИСЛОРОДА НА УСТАНОВКАХ С ЦИКЛОМ ДВУХ ДАВЛЕНИЙ, ПОРШНЕВЫМ ДЕТАНДЕРОМ И РЕГЕНЕРАТОРАМИ

Пуск установок с поршневым детандером осуществляют, используя в цикле только воздух высокого давления; схема потоков при пуске установки КТ-1000 показана на рис. 12.5. Вначале необходимо охладить теплообменник, ректификационные колонны и насадку азотных регенераторов. Для этого воздух с избыточным давлением 200 *кгс/см²*, очищенный от двуокиси углерода и влаги, расширяется — частично в поршневом детандере *3* и частично в дроссельном вентиле *13*. Холодный воздух через верхнюю колонну *9* подается в основной теплообменник *5*, а затем выбрасывается в атмосферу (первый этап). В этот период обратный поток воздуха не должен поступать в регенераторы и температура в их средней части не должна повышаться. Последующий порядок охлаждения аппаратов блока разделения и накопления жидкости сохраняется таким же, как и в установках среднего давления с детандером.



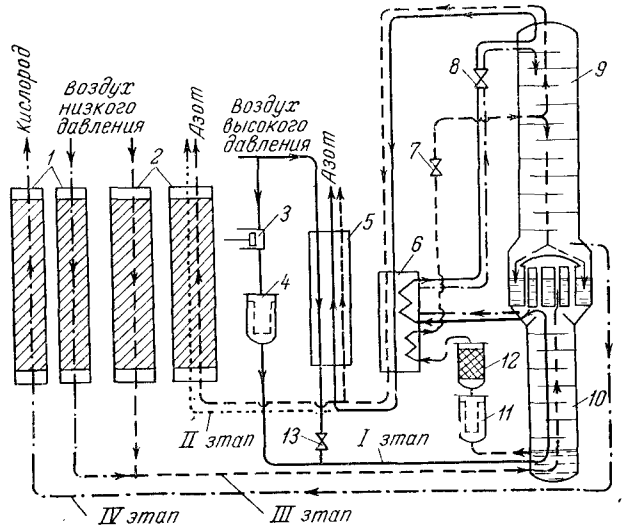



Рис. 12.5. Схема потоков при пуске установки КТ-1000:

*1* — кислородные регенераторы; *2* — азотные регенераторы; *3* — детандер; *4* — фильтр детандерного воздуха; *5* — теплообменник; *6* — переохладитель; *7* — дроссельный вентиль кубовой жидкости; *8* — азотный дроссельный вентиль; *9* — верхняя колонна; *10* — нижняя колонна; *11* — фильтр твердой $CO_2$; *12* — адсорбер ацетилена; *13* — дроссельный вентиль воздуха высокого давления.

После того как в конденсаторе будет накоплена жидкость до нормального уровня, начинают постепенное охлаждение насадки азотных регенераторов *2*, пропуская через них основную часть обратного потока газов из верхней колонны (второй этап). Во избежание сильного выпаривания жидкости в конденсаторе охлаждение насадки регенераторов следует проводить постепенно и медленно.

Когда насадка в средней части азотных регенераторов охладится до температуры минус 50—60 °С, включают турбокомпрессор и начинают подавать в установку воздух низкого давления через азотные регенераторы (третий этап). После достаточного охлаждения насадки регенераторов, когда температура воздуха* на холод-

* Температуру измеряют в конце периода теплого дутья.

ном конце их достигнет минус 168—минус 170 °С, начинается н капливание жидкости на тарелках нижней и верхней колонн.

Подачу воздуха низкого давления также следует увеличив постепенно во избежание быстрого выпаривания жидкости в осно ном конденсаторе. Кубовую жидкость в период пуска необходи подавать в верхнюю колонну только через фильтры *11* двуокис углерода и ацетиленовый адсорбер *12*. Когда подача воздуха ни кого давления достигнет примерно 80% нормальной величины закончится накопление жидкости на тарелках обеих колонн, пр ступают к наладке процесса ректификации и включают кислоро ные регенераторы *1*, пропуская через них вначале обратный пото кислорода (четвертый этап).

Отбор кислорода через кислородные регенераторы постепен увеличивают. Когда насадка в средней части кислородных реге раторов охладится до температуры минус 60 — минус 70 °С, чер них начинают пропускать воздух низкого давления. Одновремен с этим устанавливают температурный режим азотного теплообм ника.

Тепловой режим работы установки в установившемся проце регулируют распределением потока воздуха высокого давле между воздушным дроссельным вентилем и поршневым детан ром. Наилучшее распределение воздуха высокого давления соотв ствует разности температур на теплом конце теплообменника 8 10 *град*. Рабочий период установки длится до 3 месяцев.

Отогрев блока разделения воздуха производят воздухом вы кого давления, нагретым в электроподогревателе до 70—80 полный отогрев блока разделения достигается через 22—24 *ч*.

Для ускорения отогрева можно дополнительно использова также воздух низкого давления, для чего открывают воздушн принудительные клапаны на всех регенераторах и через них в чение 1—2 *ч* продувают теплый воздух. Для выхода воздуха откр вают продувочные вентили клапанных коробок на холодных кон регенераторов. С использованием воздуха низкого давления полн отогрев занимает 18—20 *ч*.

Частичный отогрев теплообменника можно сделать за 4 50 *мин*, не останавливая работы всего блока разделения возду Теплообменник, а также детандерный фильтр отогревают 1—2 ра в месяц.

Выносной дополнительный конденсатор в установках КТ-100 М включают после того, как концентрация жидкого азота в карман основного конденсатора достигнет установленной величины и дет обеспечен температурный напор, необходимый для выпари ния жидкого кислорода в трубках дополнительного конденсато Для повышения концентрации жидкого азота прикрывают в слу необходимости азотный дроссельный вентиль.

Выносной конденсатор включают медленным открыванием в тиля для подачи газообразного азота из-под крышки основно конденсатора в выносной и одновременным медленным и постепе



ым открыванием вентиля на линии поступления в выносной кон енсатор жидкого кислорода из основного конденсатора. Слишком ыстрое включение выносного конденсатора при недостаточно вы оких концентрациях жидких азота и кислорода может вызвать еполное испарение кислорода в выносном конденсаторе и прохож ение большого количества жидкости в отделитель ацетилена, что длинит пуск.

При работе установки необходимо добиваться наименьшей раз ости температур газов в средней части (по высоте) насадки каж ой пары регенераторов, определяя эту разность температур в од оименные моменты дутья (обычно в конце периода теплого дутья). емпературу в середине насадки в каждой паре регенераторов сле ует выравнивать, регулируя распределение потоков воздуха с по ощью задвижек на вводе в регенераторы, а в некоторых случаях утем кратковременной (на несколько секунд) остановки механиз ма переключения.

При повышении сопротивления в каком-либо из регенераторов следует искусственно увеличить в нем период обратного дутья для ыдувания твердой двуокиси углерода с целью снижения сопротив ления насадки или уменьшить подачу воздуха в регенератор с по вышенным сопротивлением.

Температура в конце периода теплого дутья в середине кисло родных регенераторов установки КТ-1000 в КТ-1000М должна под держиваться на 10—15 *град* ниже, чем в азотных. Это также дости гается соответствующим распределением потоков воздуха между парами регенераторов с помощью задвижек на трубопроводах под ода воздуха. Этими же задвижками пользуются для изменения емпературы в регенераторах, когда нарушение установленного теплового режима их работы вызвано регулировкой процесса рек тификации в верхней колонне. Такой случай возможен, например, при увеличении отбора кислорода через кислородные регенераторы для понижения концентрации кислорода, что приводит к охлажде нию кислородных регенераторов и отеплению азотных.

Температура в середине регенераторов установок КТ-1000 и КТ-1000М определяется соотношением количеств воздуха высокого давления, поступающих через дроссельный вентиль и детандер. Увеличение подачи воздуха в детандер приводит к повышению количеств газов обратного потока, проходящих через регенераторы, и поэтому температура в серединах генераторов понижается. Одно временно уменьшается разность температур прямого и обратного потоков газов на холодных концах регенераторов. Уменьшение подачи воздуха в детандер, наоборот, приводит к отеплению реге нераторов.

Правильность соотношения прямого и обратного потоков газов в регенераторах проверяют, сравнивая среднеарифметическую тем ературу в середине всех регенераторов с температурой, указанной в инструкции для данной установки. Если фактическая средняя тем ература мало отличается от нормы и остается примерно постоян-

ной, соотношение потоков правильно. В противном случае необходимо изменить соотношение потоков в соответствующую сторону путем перераспределения потоков воздуха в детандер и дроссельный вентиль.

Необходимо следить за тем, чтобы количество жидкости в аппарате значительно не уменьшалось, а тепловой режим регенераторов не нарушался, так как частичное выпаривание жидкости в аппарате создает опасность повышения концентрации ацетилена и выделения твердого ацетилена в испарителе, конденсаторе и других частях аппарата, что может потребовать остановки и отогрева блока разделения воздуха.

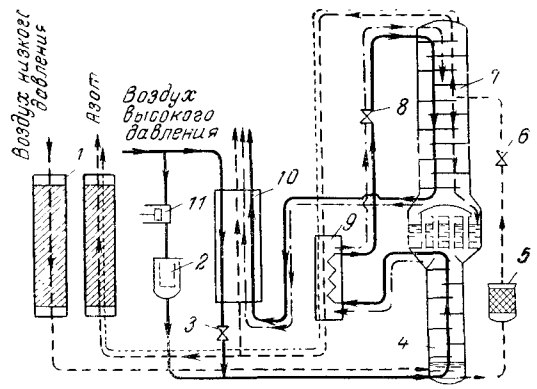



Рис. 12.6. Схема потоков при пуске установки двух давлений КГ-300М:

*1* — азотные регенераторы; *2* — детандерный фильтр; *3* — дроссельный вентиль воздуха высокого давления; *4* — нижняя колонна; *5* — адсорбер ацетилена; *6* — дроссельный вентиль кубовой жидкости; *7* — верхняя колонна; *8* — азотный дроссельный вентиль; *9* — переохладитель; *10* — теплообменник; *11* — детандер.

Если нарушается технологический режим работы установки вследствие забивки регенераторов твердой $CO_2$ (при нормально работающей колонне), то очистку регенераторов производят путем их продувки без остановки блока. Для этого в каждый регенератор через продувочный вентиль клапанной коробки поочередно подают неохлажденный, осушенный и очищенный от $CO_2$ воздух из линии высокого давления, дросселированный до избыточного давления 0,2—0,5 *кгс/см*$^2$. При этом воздух подается в периоды обратного дутья.

Кислородные регенераторы на время продувки отключают от газгольдера. Проходя через регенераторы, продувочный воздух выносит из них двуокись углерода. Если очистку регенераторов удается произвести при работающем блоке, его останавливают на 2 *ч* и продувают: азотные регенераторы в течение 20—25 *мин*, кислородные — 15—20 *мин*. Затем блок вновь пускают и восстанавливают нормальный режим; на это требуется 2—5 *ч*.

Схема потоков при пуске установок КГ-300М приведена на рис. 12.6. Весь кислород проходит через теплообменник, поэтому важно сохранить правильное соотношение количеств воздуха в потоках высокого и низкого давления для того, чтобы не вызвать переохлаждения и нагревания регенераторов. В остальном пуск установок КГ-300М производится в порядке, описанном выше для установок КТ-1000 и КТ-1000М.



## 12.6. ПОЛУЧЕНИЕ КИСЛОРОДА НА УСТАНОВКАХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

### 12.6.1. Особенности пуска и регулирования установок низкого давления

В установках низкого давления холод получается вследствие расширения воздуха низкого давления в турбодетандере. При пуске и охлаждении этих установок приходится направлять в турбодетандер воздух без предварительной осушки от влаги и очистки от двуокиси углерода. Поэтому основным условием правильного пуска

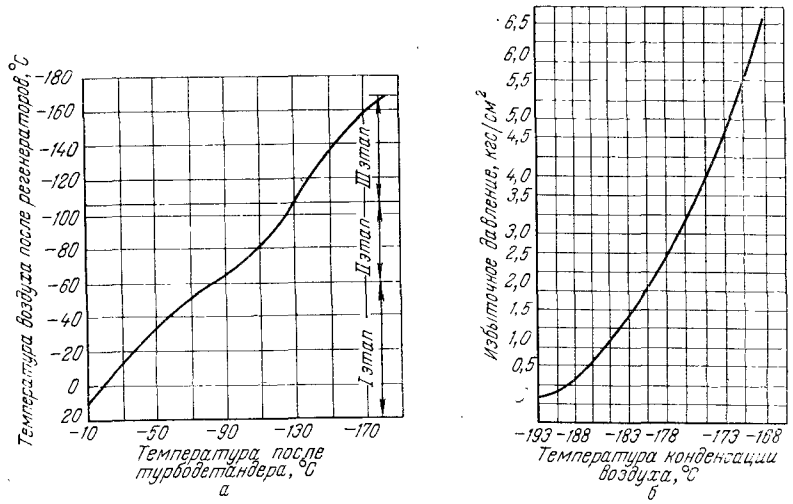



Рис. 12.7. Графики регулирования режима работы турбодетандеров при пуске блока разделения воздуха:

соотношение температур воздуха после регенераторов и турбодетандера; *б* — кривая температуры конденсации воздуха в зависимости от давления.

установок низкого давления является соблюдение такого режима последовательного охлаждения различных аппаратов блока разделения воздуха, при котором исключалось бы выпадение в них льда и твердой двуокиси углерода. Для этого нагрузку турбодетандеров при пуске регулируют, пользуясь графиком соотношения температур воздуха после холодного конца регенераторов и после турбодетандеров (рис. 12.7, *а*); давление воздуха в регенераторах должно быть максимальным, а разность температур между прямым и обратным потоками — минимальной. Благодаря этому обеспечивается необходимая самоочистка насадки регенераторов от льда и твердой двуокиси углерода.

Одним из положительных качеств воздухоразделительных установок низкого давления является способность их к саморегулиро-

ванию процесса и поддержанию холодопроизводительности цикла на уровне холодопотерь в установке. При возрастании холодопотерь уровень жидкости в конденсаторах понижается, что вызывает повышение давления в нижней колонне, так как поверхность теплопередачи конденсатора, обеспечивающая снижение поступающих из нижней колонны паров азота, сокращается. Повышение давления приводит к уменьшению количества воздуха, поступающего в блок разделения из турбокомпрессора. При этом соответственно уменьшаются потери от недорекуперации на теплом конце регенераторов, что снижает общую величину холодопотерь установки.

С другой стороны, повышение давления в колонне увеличивает давление впуска и расход воздуха в турбодетандере, что, в свою очередь, увеличивает холодопроизводительность цикла. Уменьшение холодопотерь и повышение холодопроизводительности приостанавливает падение уровня жидкости в конденсаторе. В дальнейшем этот уровень возрастает до прежней величины, и нарушенное равновесие восстанавливается. Последующее повышение уровня жидкости в конденсаторе вызывает обратные явления — снижение давления в нижней колонне, увеличение подачи воздуха, уменьшение холодопроизводительности цикла и повышение холодопотерь от недорекуперации.

Тем не менее при эксплуатации установок низкого давления приходится все же регулировать процесс, так как обычно воздух в блок разделения подается не от отдельного турбокомпрессора, а из общего коллектора. Кроме того, производительность турбодетандера не всегда точно соответствует производительности установки.

Холодопроизводительность обычно регулируют задвижкой на входе воздуха в турбодетандер*. Температура воздуха на входе и выходе турбодетандера регулируется изменением количества небалансирующегося потока воздуха и изменением температурного режима детандерного теплообменника с помощью обводного вентиля. Температура воздуха после турбодетандера должна поддерживаться на 2—3 *град* выше температуры конденсации воздуха при данном давлении (рис. 12.7, *б*).

При регулировании необходимо стремиться, чтобы через детандер проходило минимальное количество воздуха, что достигается при минимальных холодопотерях. Увеличение холодопотерь вынуждает увеличивать подачу воздуха в детандер и затем в верхнюю колонну. При этом уменьшается флегмовое отношение в верхней части верхней колонны, снижается концентрация отходящего азота и уменьшается степень извлечения кислорода из перерабатываемого воздуха.

---

* При отсутствии специальных устройств для регулирования холодопроизводительности турбодетандера (см. гл. 6).



При работе в зимние и летние периоды следует пользоваться разными направляющими аппаратами для турбодетандеров или регулировать производительность поворотом лопаток направляющего аппарата.

### 12.6.2. Пуск основного блока БР-1

Рассмотрим в качестве примера пуск установки низкого давления БР-1 (рис. 12.8), состоящий из шести этапов[13].

Перед пуском блок разделения воздуха должен быть полностью отогрет и продут, а силикагель в адсорберах ацетилена подвергнут высокотемпературной регенерации продувкой воздухом.

**Первый этап** — охлаждение азотных регенераторов и детандерного теплообменника до температуры минус 60 — минус 70 °С на холодном конце регенераторов. Потоки воздуха на данном этапе пуска показаны на рис. 12.8, *а* сплошной линией.

Включают турбокомпрессор, поднимают избыточное давление до 5,5—6 *кгс/см*$^2$ и подают воздух в блок разделения воздуха через один из азотных регенераторов *2*. Основная часть воздуха (85%) после регенератора направляется на расширение в турбодетандеры *6* через детандерный теплообменник *9*.

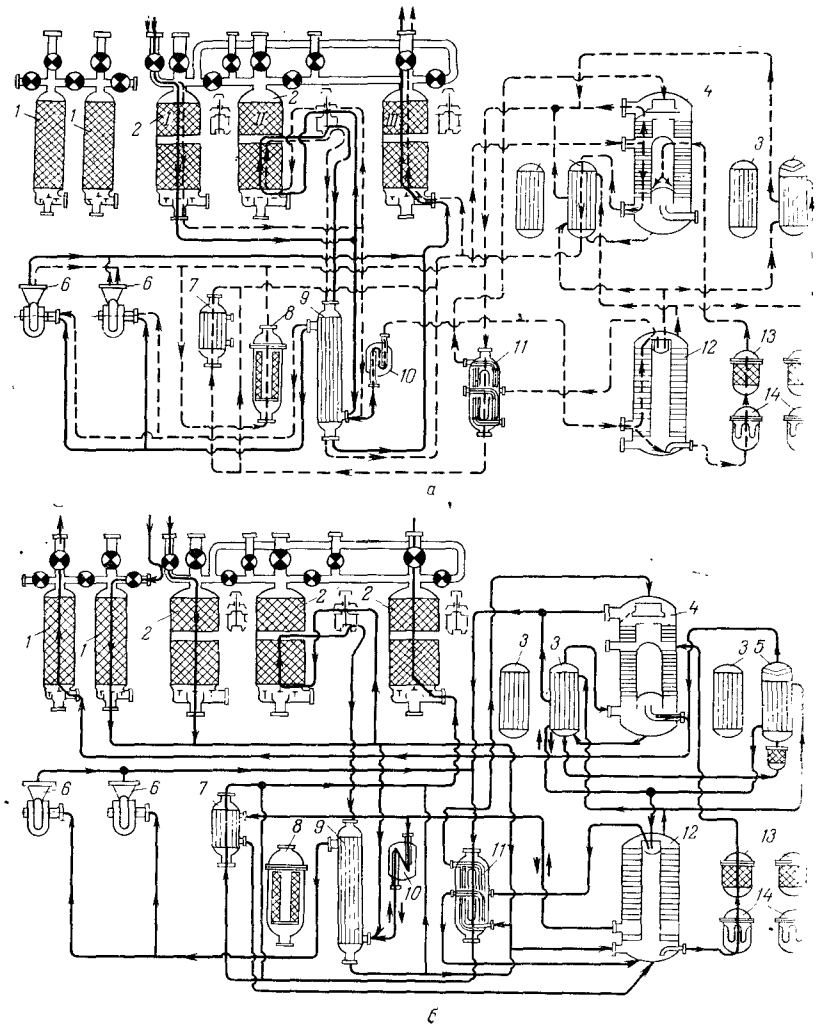
Турбодетандеры включают последовательно: вначале один, а затем через некоторое время второй. Расширившийся воздух из турбодетандеров поступает в линию обратного потока через второй азотный регенератор *2*, охлаждая его насадку, и выходит в атмосферу. Регенераторы переключаются механизмом переключения клапанов через каждые 3 *мин*. Остальная часть (12—15%) воздуха из первого азотного регенератора направляется в третий азотный регенератор, проходит через него снизу вверх, отводится из середины через петлевые клапаны и дросселирующий пусковой вентиль в детандерный теплообменник *9*, а затем примешивается к обратному потоку воздуха из турбодетандеров.

Подачу воздуха в турбодетандеры регулируют с помощью вентилей на трубопроводе так, чтобы температура воздуха после турбодетандеров в течение первого этапа пуска оставалась ниже температуры воздуха после холодного конца регенераторов на 20—25 *град* (для предупреждения выпадения льда в турбодетандерах).

Для того чтобы насадка регенераторов самоочищалась обратным потоком воздуха от льда, петлевой поток должен составлять 12—15% количества воздуха, подаваемого в блок разделения.

Первый этап пуска заканчивается, когда температура воздуха после холодного конца регенераторов понижается до минус 60 °С, а температура после турбодетандеров составляет минус 90 °С (см. рис. 12.7, *а*).

**Второй этап** — постепенное охлаждение остальных аппаратов блока разделения воздуха до получения температуры воздуха после турбодетандеров минус 130 °С, соответствующей началу выпа-



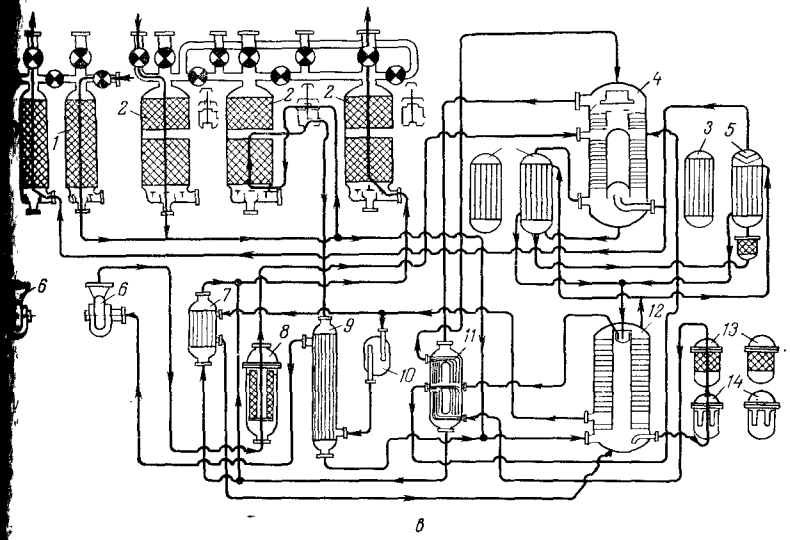

дения кристаллов твердой двуокиси углерода. Температура возду после регенераторов при этом составляет около минус 100 °С.

На данном этапе петлевой поток поддерживают равным 15 общего количества воздуха.

Разность температур на холодном конце регенераторов не дол на превышать 10 *град*.

В течение второго этапа пуска продолжается охлаждение азо ных регенераторов *2*, детандерного теплообменника *9* и начинает постепенное и последовательное охлаждение переохладителя *1* верхней колонны *4*, конденсаторов *3* и *5*, нижней колонны *1* фильтров *14*, адсорберов *13* и газового адсорбера *8* ацетилена.






ис. 12.8. Схемы потоков при пуске блока разделения воздуха установок низкого давления БР-1:

а — *I*, *II*, *III* и *IV* этапы (сплошная линия — *I* и *III* этапы, пунктирная—*II* и *IV* этапы); б — накопление жидкости в аппаратах (*V* этап); *в* — перевод блока на рабочий режим (*VI* этап); *1* — кислородные регенераторы; *2* — азотные регенераторы; *3* — основные конденсаторы; *4* — верхняя колонна; *5* — дополнительный конденсатор; *6* — турбодетандеры; *7* — подогреватель азота; *8* — газовый адсорбер; *9* — детандерный теплообменник; *10* — отделитель жидкости; *11* — переохладитель; *12* — нижняя колонна; *13* — адсорберы ацетилена; *14* — фильтры двуокиси углерода.

При охлаждении всех аппаратов подача воздуха в турбодетандер должна быть максимальной, соответствующей наибольшей допустимой нагрузке генератора турбодетандера. Каждый аппарат блока разделения воздуха включают на охлаждение только тогда, когда температура воздуха после турбодетандеров начнет понижаться. При пуске нельзя допускать «отепления» установки, т. е повышения температуры воздуха после турбодетандеров.

**Третий этап** — охлаждение азотных регенераторов и детандерного теплообменника до рабочей температуры воздуха на холодном конце регенераторов, равной минус 168 — минус 170 °С. Потоки воздуха на третьем этапе совпадают с потоками на первом этапе пуска.

Для предупреждения выпадения твердой $CO_2$ в турбодетандерах в течение третьего этапа пуска разность между температурой воздуха после регенераторов и после турбодетандеров поддерживается в пределах 10—15 *град* путем уменьшения подачи воздуха в турбодетандеры. Разность температур воздуха прямого и обратного потоков на холодном конце регенераторов поддерживается 6— *град*.

**Четвертый этап** — охлаждение остальных аппаратов блока разделения до рабочих температур. Направление потоков воздуха сов-

падает со вторым этапом пуска. В этот период пуска разность те ператур на холодном конце регенераторов поддерживается 6 *град,* а нагрузка турбодетандеров доводится до максимально пустимой.

Температура воздуха после турбодетандеров должна быть 1—2 *град* выше температуры конденсации воздуха при данном д лении (см. рис. 12.7, *б*). Вначале охлаждают переохладитель, и к да температура воздуха за ним снизится до минус 177 — ми 189 °С, включают на охлаждение остальные аппараты. Количес подаваемого в блок разделения воздуха поддерживают на уро 40 000 *м*³/*ч*. Когда аппараты охладятся, температура воздуха ратного потока перед регенераторами начнет несколько понижа ся. Тогда начинают следующие этапы пуска: накапливание жид сти и перевод блока разделения воздуха на рабочий режим.

**Пятый этап** — накапливание жидкости; схема потоков показ на рис. 12.8, *б*. Предварительно закрывают дроссельный вентиль входе жидкого кислорода в дополнительный конденсатор, а др сельный вентиль на потоке кубовой жидкости открывают на ¼ о рота. Для конденсации воздуха используется поверхность подо вателя азота *7* и переохладителя кубовой жидкости *11*. Сжа воздух из коллектора холодного конца регенераторов поступа трубки переохладителя кубовой жидкости. В межтрубное простр ство подогревателя азота сжатый воздух поступает из нижней лонны *12*.

Воздух конденсируется вследствие теплообмена с воздухом, р ширившимся в турбодетандерах и проходящим по межтруби пространству переохладителя кубовой жидкости *11* и по труб подогревателя азота *7*. Образующаяся при этом жидкость сте в нижнюю колонну *12*. Когда в кубе нижней колонны накопи достаточное количество жидкости, ее полностью сливают и ана зируют на содержание ацетилена. После вторичного накопле жидкость вновь анализируют на содержание ацетилена. Если личество его ниже нормы, жидкость перепускают в верхнюю ко ну *4* через фильтры двуокиси углерода *14*, адсорберы ацетилен и дроссельный вентиль, минуя переохладитель *11*. Жидкость по пенно накапливается в сборнике верхней колонны, а также в к муникациях основных конденсаторов *3*.

В этот период пуска нагрузку турбодетандеров по воздуху п держивают максимальной, поступление воздуха в блок разделе воздуха составляет 40 000 *м*³/*ч*, а избыточное давление перед р нераторами 5,5—5,8 *кгс*/*см*². Температура воздуха после регене торов (в конце периода теплого дутья) и после турбодетанде должна быть соответственно на 3—5 и на 2—3 *град* выше темпе туры его конденсации при данном давлении.

Повышение температуры воздуха после турбодетандеров до гается снижением давления воздуха перед ними.

По мере повышения уровня жидкости в сборнике верхней лонны и в коммуникациях конденсаторов увеличивается конде



воздуха в межтрубном пространстве конденсаторов, а также растает поступление воздуха в блок разделения; начинается капливание жидкости на тарелках верхней колонны. Когда в мммуникациях конденсаторов жидкость поднимается до уровня —70 *см,* ее полностью сливают и одновременно производят ана з на содержание ацетилена.

Затем вторично накапливают жидкость до уровня 100—120 *см* борнике верхней колонны и вновь анализируют ее на содержание етилена. Если ацетилена не обнаружено, продолжают накапли ть жидкость в сборнике и на тарелках верхней колонны. В этот риод детандерный и петлевой потоки воздуха переключают с сковых коммуникаций на рабочие, по которым воздух поступает нижнюю колонну. Когда сопротивление нижней колонны и кон нтрация жидкого азота в сборнике нижней колонны будут близки норме, открывают азотный дроссельный вентиль и включают азот ю секцию переохладителя *11*.

После заполнения всех тарелок обеих колонн жидкостью, что ределяется по величине сопротивления колонн и повышению овня жидкости в сборнике верхней колонны до 100 *см,* медленно ключают дополнительный конденсатор *5* и пускают газообразный слород через кислородные регенераторы *1*, выбрасывая через ехходовой клапан первые порции кислорода в атмосферу. Постепенно подачу кислорода в дополнительный конденсатор увеличивают, поддерживая постоянный уровень жидкости в сборнике верхней колонны.

Полное количество воздуха в кислородные регенераторы начинают подавать тогда, когда температура в средней части их насадки станет равной минус 50 — минус 60 °С, а температура кислорода перед регенераторами — минус 175 — минус 180 °С.

**Шестой этап** — перевод блока разделения воздуха на рабочий режим (рис. 12.8, *в*). Для этого холодопроизводительность установки уменьшают, выключив один турбодетандер; предварительно постепенно уменьшают подачу воздуха в отключаемый турбодетандер соответственно увеличивают нагрузку второго турбодетандера о максимальной. При этом уровень жидкости в верхней колонне е должен снижаться. Обычно период постепенного отключения урбодетандера занимает 6—8 *ч*. На этом этапе включают змеевик ереохладителя *11* кубовой жидкости, расположенный после фильтов и адсорберов на линии подачи жидкости в верхнюю колонну. Уровень жидкости в кубе нижней колонны поддерживают 60—0 *см*. Постепенно переходят на подачу всего турбодетандерного оздуха в верхнюю колонну, полностью закрыв его вывод в переохладитель *11*. Отбор газообразного кислорода увеличивают до максимального, поддерживая его концентрацию 95,5—97%.

После этого начинают нормальный процесс получения кислорода, осуществляя регулирование блока разделения воздуха в соответствии с установленными нормами и показателями технологического режима.

Общая продолжительность пуска блока разделения воздуха установки БР-1 из теплого состояния составляет 70—80 *ч*.

Температуру в середине регенераторов регулируют изменением количества небалансирующегося потока воздуха через задвижку, установленную на линии подачи воздуха из регенераторов в нижнюю колонну. Чем больше сопротивление, создаваемое этой задвижкой, тем больше количество петлевого воздуха и тем ниже температура в середине регенераторов. Создаваемое задвижкой сопротивление одновременно вызывает повышение давления после турбокомпрессора на входе в регенераторы, что приводит к увеличению расхода энергии. Это является недостатком способа тепловой петли, осуществляемой по принципу тройного дутья в регенераторах.

### 12.6.3. Пуск блока криптона и технического кислорода БР-1

Блок криптона и технического кислорода установки БР-1 включается в работу (рис. 12.9) за 24 *ч*; это может быть проведено только после установления нормального режима для основного блока

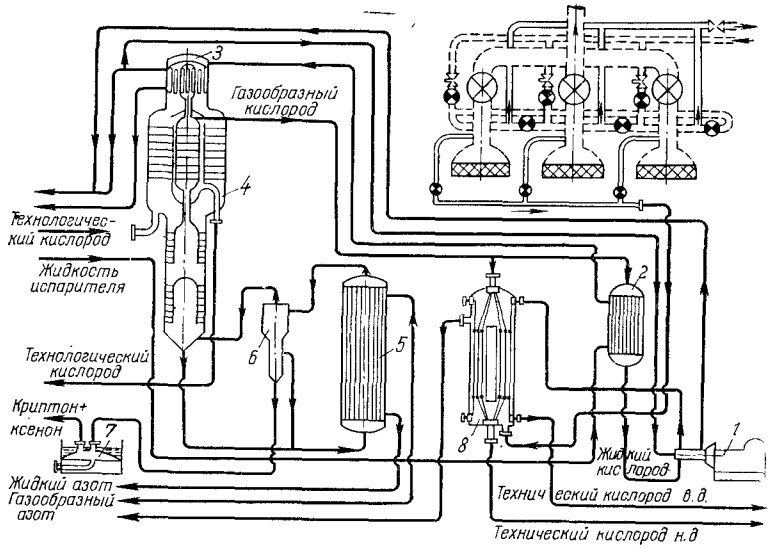



Рис. 12.9. Схема потоков при пуске блока криптона и технического кислорода установки БР-1:

*1* — насос жидкого кислорода; *2* — теплообменник-охладитель кислорода; *3* — верхний конденсатор криптоновой колонны; *4* — криптоновая колонна; *5* — нижний конденсатор; *6* — отделитель криптонового концентрата; *7* — испаритель криптонового концентрата; *8* — теплообменник технического кислорода.

разделения воздуха. При включении дополнительного блока происходит некоторое перераспределение потоков в регенераторах, в частности уменьшается нагрузка на кислородные регенераторы.



ж технический кислород отбирается через предусмотренный для его теплообменник. В азотных регенераторах увеличивается количество воздуха прямого потока, а часть петлевого потока проскакивает через весь регенератор и затем поступает в теплообменник технического кислорода.

В теплообменник технического кислорода подается 1 $м^3$ воздуха на 1 $м^3$ кислорода низкого давления и 2 $м^3$ воздуха на 1 $м^3$ кислорода высокого давления.

Во избежание переохлаждения азотных регенераторов и увеличения недорекуперации на теплом конце количество петлевого воздуха, отбираемого из их середины, приходится уменьшать примерно на 10%.

Поскольку включение блока криптона и технического кислорода вызывает дополнительные потери холода (на 10—15%), приходится увеличивать подачу воздуха в турбодетандер. Количество петлевого воздуха, отбираемого для подогрева детандерного воздуха и обеспечения нормальной работы азотных регенераторов, должно быть уменьшено на 1—1,5%. В связи с этим температурный уровень процесса расширения воздуха в турбодетандере несколько понижается.

Для сохранения нормального режима работы основного блока разделения воздуха в период включения и последующей работы блока криптона и технического кислорода необходимо поддерживать:

наивыгоднейший температурный режим работы регенераторов соответствующим регулированием количества петлевого воздуха;

давление воздуха перед турбодетандером, при котором уровень жидкости в верхней колонне остается постоянным;

постоянную концентрацию получаемого кислорода регулировкой его отбора.

Перед включением блока криптона и технического кислорода подачу воздуха в основной блок разделения воздуха прекращают на короткое время для установки заглушек на перепускных клапанах азотных регенераторов. Это необходимо для того, чтобы выбрасываемый при переключении регенераторов остаточный воздух, содержащий влагу, не попадал в теплообменник технического кислорода и не забивал его льдом. Когда на выходе из теплообменника температура отходящего технического кислорода начнет понижаться, в межтрубное пространство теплообменника подают петлевой воздух, поддерживая недорекуперацию на теплом конце теплообменника в пределах 8—10 *град*. Постепенно отбор технического кислорода увеличивают до максимального (500 $м^3/ч$) и включают кислородный насос в порядке, установленном инструкцией.

Пусковой период для блоков разделения, имеющих регенераторы с каменной насадкой, примерно в 2 раза больше, чем для блоков, регенераторы которых заполнены алюминиевой насадкой. Это обусловлено тем, что масса каменной насадки больше, чем алюминиевой, и требуется больше холода для ее охлаждения до рабочих

температур. Например, длительность пуска блоков разделения ... духа установок АКт-16-1 и АКт-16-2 составляет около 1... АКт-17-1 — около 120 *ч*, БР-14 — около 100 *ч*. Соответственно ... личивается продолжительность полного отогрева блока.

### 12.6.4. Ускоренный пуск блоков низкого давления

Описанный выше порядок пуска блоков низкого давления ... печивает постепенное охлаждение их до рабочих температур, ... вызвано использованием аппаратов и коммуникаций из цве... металлов (меди, латуни) с применением большого количества ... ных и фланцевых соединений, чувствительных к резким колеба... температуры. В новых воздухоразделительных блоках широко ... пользуются цельносварные аппараты и трубопроводы из нержа... щих сталей и алюминия, способные выдерживать более бы... охлаждение. Поэтому для современных блоков используются ... ды ускоренного пуска. Обычно эти блоки пускают в четыре э...

**Первый этап** — охлаждение азотных регенераторов, детан... ного теплообменника и переохладителя-подогревателя до теми... туры воздуха на холодном конце регенераторов минус 168 — ... 170 °С.

**Второй этап** — охлаждение остальных аппаратов блока до ... бочих температур (кроме кислородных регенераторов).

**Третий этап** — накопление жидкости в блоке разделения, в... чение кислородных регенераторов, перевод на нормальный ре... детандерного и петлевого потоков воздуха, включение трубч... концентратора неоно-гелиевой смеси, налаживание режима ос... ных аппаратов.

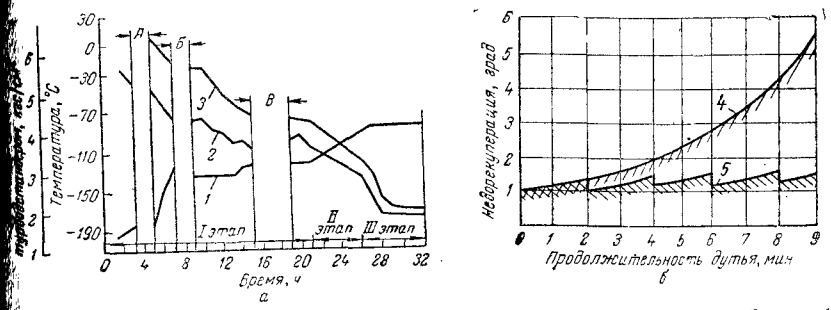
**Четвертый этап** — перевод всего блока на нормальный реж... включение криптоновой колонны, испарителя-конденсатора, а... ратуры для получения чистого азота, технического кислорода и ... соса жидкого кислорода.

Для быстрого прохождения интервала температур выпаде... льда и твердой двуокиси углерода во время первого этапа охл... дают наименьшее число аппаратов, в основном — азотные рег... раторы. Для того чтобы обеспечить самоочистку насадки регене... торов от льда и твердой $CO_2$ поддерживают установленную ... ность температур воздуха прямого и обратного потоков на хо... ном конце регенераторов, используя для этого петлевой поток ... духа, который должен составлять 12—15% общего расхода воз... ха при пуске. При температуре воздуха после холодного конца ... минус 130 °С разность температур на холодном конце регенератор... не должна превышать 15 *град*, при температурах ниже ми... 130 °С — не более 8—10 *град*.

Давление воздуха перед турбодетандерами (нагрузку) регули... руют вентилем, установленным на впускном трубопроводе каждо... турбодетандера. Температура воздуха после детандеров, как пок...



...л опыт* (рис. 12.10, *а*), может быть значительно ниже той, при ...торой возможно выпадение частиц льда и твердой $CO_2$ после ...рбодетандера, так как эти примеси выносятся воздухом обратно... потока. Нагрузку турбодетандеров регулируют по разности тем... ратур воздуха после азотных регенераторов и после турбодетан-




...с. 12.10. Изменение температур и давлений воздуха при пуске блока (*а*) и ...дорекуперация на теплом конце регенераторов блока АКт-15(БР-6) при раз... ной продолжительности дутья (*б*):

...2 — температура воздуха после регенераторов и турбодетандеров; *3* — давление воздуха ...ред турбодетандером; *4* — нормальная продолжительность дутья (период переключения 9 *мин*); *5* — сокращенная до 2 *мин*; *А*, *Б* и *В* — перерывы для ремонта.

...еров. В начале пуска эта разность может составлять 45—50 *град*, ...о по мере охлаждения регенераторов ее уменьшают и поддержи... ают в пределах:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Температура на холодном конце, °С | —70 | —130 | Ниже —130 |
| Разность температур воздуха, *град* | 25—30 | 15—20 | 10—15 |

Давление воздуха в регенераторах все время поддерживают ...аксимально допустимым, при котором еще не может происходить ...нденсация воздуха в коммуникациях, аппаратах и турбодетанде... ах, руководствуясь графиком (см. рис. 12.7, *б*). Для уменьшения ...отерь холода от недорекуперации на теплом конце регенераторов ...окращают продолжительность дутья.

При продолжительности дутья прямого потока 9 *мин* (кривая *4*, ...ис. 12.10, *б*) недорекуперация составляет в начале дутья 1 *град*, ... конце дутья 5,5 *град*. Потери холода пропорциональны величине ...едорекуперации и площади под кривой *4*. При сокращении про... олжительности дутья до 2 *мин* (кривая *5*) недорекуперация умень... шается до 1,3 *град*, а потери холода, пропорциональные площади ...од кривой *5*, снижаются примерно в 2 раза. Одновременно улуч... шаются условия уноса примесей с насадки регенераторов обратным ...потоком воздуха. Этот способ ускорения пуска установки представ... ляет особый интерес при наличии регенераторов с каменной насад-

* Шмелев В. А., Обзоры «Кислородная промышленность», № 2, 1967.

кой. Например, продолжительность пуска установки БР-6 сокращается со 160—180 до 60 *ч*.

Режим пуска устанавливают для каждого воздухоразделительного блока низкого давления опытным путем с учетом особенностей технологической схемы, конструкции аппаратов, изготовления и монтажа данного блока; проверенный опытом режим пуска вносится в производственную инструкцию по обслуживанию воздухоразделительной установки.

### 12.6.5. Отогрев установок низкого давления

**Полный отогрев.** Отогрев установок низкого давления производят воздухом от турбокомпрессора. При отогреве перед первым пуском установки из теплого состояния воздух подается в регенераторы через клапаны (при работающем механизме переключения), дросселируется до избыточного давления 0,4 *кгс/см²*, нагревается в паровом подогревателе до 60—80 °С и поступает в аппараты блока разделения. Дросселированный и подогретый воздух имеет незначительную относительную влажность и при отогреве способствует высушиванию аппаратов блока, поглощая скопившуюся в них влагу, которую уносит обратный поток воздуха, уходящий через регенераторы в атмосферу[13].

Отогрев установки после окончания рабочей кампании проводится из холодного состояния при охлажденных регенераторах, в которых обеспечивается полная осушка отогревающего воздуха. Нагрев воздуха до 60—80 °С осуществляется в паровом подогревателе. Схема потоков при отогреве показана на рис. 12.11. Перед подогревателем воздух, как и при отогреве из теплого состояния, дросселируется. Пройдя аппараты, отогрев их и поглотив влагу, воздух выходит в атмосферу через кислородные и азотные регенераторы по линиям кислорода и азота. В процессе отогрева регенераторы остаются более холодными, чем остальные аппараты.

Для предупреждения больших температурных напряжений в металле аппаратов температуру греющего воздуха повышают постепенно, пользуясь для этого обводной линией и в случае необходимости примешивая более холодный воздух к потоку его после подогревателя. Разность между температурами воздуха после подогревателя и регенераторов не должна превышать 30—40 *град.* Для обеспечения осушки воздуха в регенераторах и выноса осадков обратным потоком температура воздуха обратного потока перед регенераторами должна превышать температуру воздуха на выходе из них не более чем на 10—15 *град.*

Указанную разность температур регулируют соответствующим подогревом и распределением греющего воздуха между отогреваемыми аппаратами. Воздух направляют сначала в нижнюю и верхнюю колонны и азотный коллектор, а из него — на отогрев адсорберов ацетилена (на потоке кубовой жидкости и жидкого кислорода) и фильтра двуокиси углерода.



После отогрева одного из указанных аппаратов включают кислородные регенераторы, для чего из верхней колонны часть потока греющего воздуха подают по кислородной линии в регенераторы. Соответствующее количество воздуха прямого потока подается в кислородные регенераторы из турбокомпрессора. Отогрев кислородных регенераторов должен идти одновременно с азотными; если же они отогреваются быстрее, то их на время отключают. Регулируя распределение греющих потоков воздуха между верхней и нижней колоннами путем изменения его количества, поступающего в верхнюю колонну, обеспечивают их равномерный отогрев.

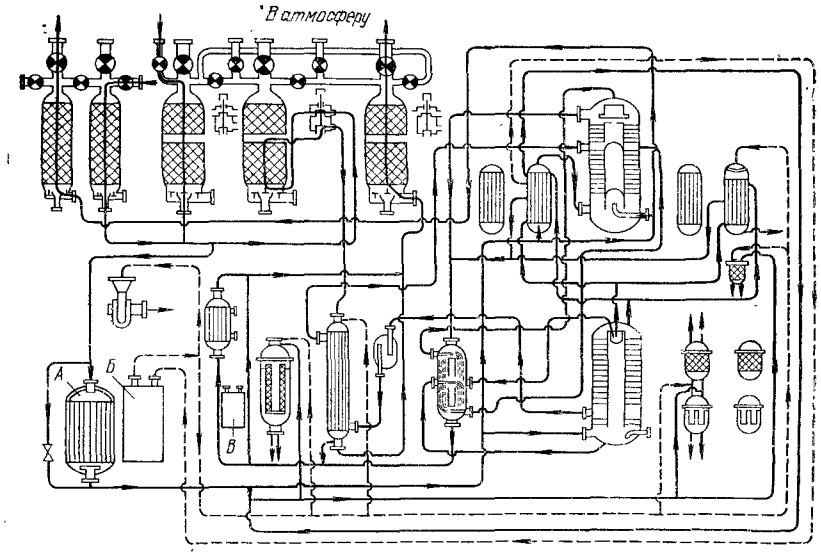



Рис. 12.11. Схемы потоков при отогреве блоков разделения воздуха установок низкого давления БР-1:

*А* — паровой подогреватель воздуха; *Б* — электроподогреватель воздуха; *В* — электроподогреватель азота; сплошные линии — полный отогрев, пунктирные — частичный отогрев. Обозначение аппаратов см. рис. 12.8, *а*.

Отогрев адсорберов заканчивают при температуре воздуха на выходе из них 5—10 °С, после чего включают отогрев трубного пространства выносного конденсатора. Температуру греющего воздуха повышают по мере прогревания аппаратов, прикрывая обводный вентиль подачи холодного воздуха. Подачу греющего воздуха увеличивают до тех пор, пока сопротивление нижней колонны не превысит 500—600 *мм вод. ст.* Когда температура воздуха на холодном конце регенераторов близка к 0 °С, часть греющего воздуха начинают подавать в изоляцию блока. При температуре воздуха на холодном конце регенераторов 20—30 °С производят поочередно продувку всех аппаратов, проверяя, идет ли из них теплый и сухой воздух. Отогрев заканчивают при достижении в середине регенераторов температуры 25—30 °С.

**Частичный отогрев.** Направление потоков греющего воздуха при частичных отогревах аппаратов установок низкого давления показано на рис. 12.11 пунктирными линиями. Частичному отогреву подвергают:

детандерный теплообменник при возрастании сопротивления до 2000 *мм вод. ст.;*

адсорбер на линии жидкого кислорода перед выносным конденсатором, если при открытии вентиля подачи жидкого кислорода из сборника верхней колонны не удается повысить уровень жидкости в трубном пространстве выносного конденсатора;

выносной конденсатор, когда количество испаряющегося в нем жидкого кислорода снижается до предела, указанного в инструкции;

газовый адсорбер, если давление воздуха после турбодетандера станет выше давления в верхней колонне на 0,2 *кгс/см*$^2$.

Перед отогреванием аппаратов из них сливают жидкость, предварительно накопив ее в конденсаторах, верхней и нижней колоннах. Остатки жидкости из отогреваемых аппаратов удаляют продувкой их неподогретым азотом. Отогрев производят азотом, нагретым в электроподогревателе, пропуская азот через отогреваемый аппарат до тех пор, пока температура его на выходе не достигнет 5—10 °С. Азот для отогрева отбирается из основных конденсаторов.

**Отогрев дополнительного блока.** Дополнительный блок криптоно-ксенонового концентрата и технического кислорода отогревают если производится отогрев основного блока или забиты тарелки криптоновой колонны твердой двуокисью углерода или концентрация ацетилена в отделителе жидкости превышает допустимые пределы. Схема потоков при отогреве дополнительного блока приведена на рис. 12.12. Пунктирной линией показаны потоки при совместном отогреве дополнительного и основного блоков; сплошной — при отогреве в случае забивки тарелок криптоновой колонны и повышении концентрации ацетилена в отделителе жидкости.

Если дополнительный блок отогревается при работающем основном блоке, то греющий газ выбрасывается в атмосферу через продувочные линии аппаратов.

Перед отогревом из аппаратов сливают жидкость, затем продувают их сначала холодным, а затем подогретым (в подогревателе) до 50—60 °С воздухом, отбираемым после холодного конца регенераторов и подводимым к аппаратам через коллектор для отогрева.

Отогревание и продувку заканчивают при температуре выходящего из продувочных линий сухого воздуха, равной 30 °С.

При совместном отогреве основного и дополнительного блоков греющий воздух подается в нижний конденсатор и колонну через вентиль *1*, а отводится в азотные регенераторы через вентиль 2. В остальные аппараты греющий воздух подается также из коллектора отогрева и возвращается в основной блок через соответствующие коммуникации. Межтрубное пространство теплообменника



нического кислорода отогревается отдельно, а греющий воздух выбрасывается в атмосферу. Этот теплообменник и кислородный насос можно отогревать и во время работы дополнительного блока.

**Особенности отогрева установки низкого давления БР-6.** Блок БР-6 отогревается в той же последовательности, что и блок БР-1. Вымораживатели отогревают воздухом, взятым из коллектора после регенераторов и подогретым в паровом подогревателе. Имеется

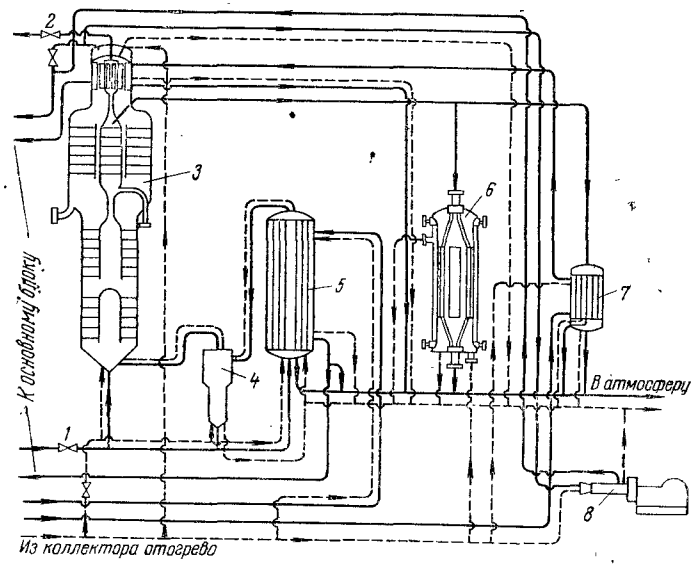



Рис. 12.12. Схема потоков при отогреве дополнительного блока криптона и технического кислорода:

1 — вентили для подачи и отвода греющего воздуха; 3 — криптоновая колонна; 4 — отделитель криптонового концентрата; 5 — нижний конденсатор; 6 — теплообменник технического кислорода; 7 — теплообменник-охладитель кислорода; 8 — насос жидкого кислорода. Сплошные линии — отогрев при забивке тарелок криптоновой колонны и повышении концентрации ацетилена в отделителе жидкости; пунктирные линии — совместный отогрев дополнительного и основного блоков.

возможность периодических отогревов аппаратов азотом. Для экономии электроэнергии (сокращения холодопотерь) вымораживатель и выносной конденсатор следует отогревать воздухом. При полном отогреве вымораживатели отогревают воздухом, отбираемым из нижней колонны по трубопроводу детандерного воздуха. Далее этот греющий воздух в небольшом количестве идет на отогрев турбодетандеров, а основная часть через обводной вентиль поступает для отогрева верхней колонны.

Греющий воздух из верхней колонны направляется в регенераторы двумя путями: по линии грязного азота через переохладитель обратной жидкости и подогреватель азота и по линии чистого азота через переохладитель чистой азотной флегмы и подогреватель чистого азота. В кислородные регенераторы в качестве обратного по-

тока поступает греющий воздух по линии грязного азота. Возду средней части регенераторов проходит вымораживатели и сбр вается в линию грязного азота.

Колонна технического кислорода и адсорберы отогревают ду́хом из азотного коллектора; воздух затем направляют в верх колонну. Вымораживатели периодически отогревают воздухо воздушных змеевиков кислородных регенераторов. При необх мости ускорения процесса отогрева этот воздух нагревают в по гревателе азота. Возможен отогрев вымораживателей подогре азотом.

**Очистка регенераторов от двуокиси углерода.** Для очистки р нераторов установок низкого давления можно применять раз ные способы*.

Продувка. Свободный от влаги и двуокиси углерода во подогревается до температуры 20—40 °С и подается в клапан коробку холодного конца регенератора. Проходя через наса воздух подогревает ее, насыщается двуокисью углерода и вы сывается в атмосферу. Продувку заканчивают при температуре садки в середине регенераторов минус 60 — минус 70° С. При условиях насадка практически полностью очищается от отлож $CO_2$.

Частичный отогрев. При частичном отогреве реге торов подача воздуха на разделение прекращается. Постепенно догревая воздух, выходящий из нижней зоны насадки регене ров, доводят температуру насадки на холодном конце до м 30 °С. Температура насадки в средней зоне регенераторов дол быть не ниже минус 60 — минус 70 °С. Отогрев заканчивают содержании в выходящем из регенератора в атмосферу воз (обратном потоке) 0,05—0,03% $CO_2$.

В теплообмене используется поток петлевого воздуха, спосо вующий перемещению $CO_2$ из нижней зоны насадки регенера в среднюю.

Расход воздуха на отогрев азотных регенераторов устано Кт-12 и КтК-35 составляет соответственно 30 000 и 70 000 продолжительность отогрева 2—2,5 и 3—3,5 *ч*. Для отогрева ки родных регенераторов установки КтК-35 требуется 1—1,5 *ч*.

Предложен способ частичного отогрева и продувки регене ров** для очистки от $CO_2$ путем подачи в обратный поток (в пе треть периода дутья) сухого воздуха, подогретого до 40—5 Температура смеси должна быть выше температуры возду конце периода теплого дутья. При этом отложившаяся твердая перемещается из холодного конца насадки в ее среднюю В последнюю часть периода дутья в регенератор подается то холодный обратный поток воздуха.

---

* См. Хомякова Е. П., Кислородная промышленность, М НИИТЭХИМ, 1969.

** Авт. свид. СССР 179339, Бюлл. изобр., № 5, 1966.



Режим продувки регенераторов КТ-3600 указанным способом дующий. В течение 2—2,5 *ч* в начале каждого периода в обрат ой поток в течение 60 *сек* подается воздух, подогретый до 40 °С, бодный от влаги. Температура смеси около минус 150 °С. Затем дув прекращают и температуру обратного потока перед реге раторами поддерживают минус 176 °С. При длительности подду 60 *сек* температура прямого потока после холодного конца со аняется на уровне минус 159 °С, при длительности поддува *сек* — минус 166 °С.

При этом способе отогрева сопротивление азотных регенерато в после продувки снижалось с 235 до 170 *мм рт. ст.*

Применение продувки и частичных отогревов регенераторов зволяет очистить их от $CO_2$ и увеличить длительность работы ока между полными отогревами.

## 12.7. РАБОТА КИСЛОРОДО-АРГОННЫХ АППАРАТОВ

Обслуживание воздухоразделительного аппарата с дополнитель ой аргонной колонной имеет некоторые особенности.

Перед пуском аргонная колонна должна быть полностью ото ета и продута. Отогрев следует начинать через 2,5—3 *ч* после чала отогрева основного воздухоразделительного аппарата, ког верхняя колонна его уже достаточно прогрелась.

При отогреве аргонной колонны открывают на 2—3 оборота ентиль подачи обогащенной кислородом жидкости в конденсатор ргонной колонны. Колонна при этом должна быть отключена от згольдера сырого аргона, вентиль для выпуска сырого аргона в тмосферу полностью открыт, все указатели уровня жидкости и анометры на щите аргонной колонны отключены от трубок. Ото рев считают законченным, если из колонны выходит сухой воздух ри температуре 30 °С. Продувку аргонной колонны производят одновременно с продувкой верхней колонны.

**Пуск аргонной колонны.** В пусковой период охлаждение аргон ой колонны производят одновременно с охлаждением верхней ко онны. В этом случае аргонную колонну можно включать в работу ерез 3 *ч* после установления нормального режима верхней колон ны. Концентрацию отходящего из конденсатора верхней колонны кислорода следует поддерживать в пределах 98,9—99% (после теп лообменника или регенераторов).

В начале пуска аргонной колонны вентиль подачи жидкости из куба нижней колонны в конденсатор аргонной колонны открывают на 1/3 оборота. Затем анализируют состав кубовой жидкости, про еряют концентрацию отходящего кислорода и следят за показа ниями дифманометра дроссельной шайбы, которая установлена на линии паров кубовой жидкости, поступающих из конденсатора ар гонной колонны в верхнюю колонну.

Если концентрация отходящего кислорода и уровень жидкости кубе понижаются, а перепад давления на диафрагме возрастает,

подачу жидкости в конденсатор аргонной колонны уменьшают: при нормальном течении процесса и постоянном перепаде на диафрагме подачу жидкости в аргонную колонну увеличивают до тех пор, пока уровень жидкости в конденсаторе аргонной колонны не установится на высоте 3—5 *см* по шкале указателя уровня.

Во время налаживания режима работы аргонной колонны проверяют содержание кислорода во фракции, отбираемой из верхней колонны; концентрация кислорода должна быть в пределах 89—91%. Состав отбираемой аргонной фракции зависит от степени открытия вентиля на трубе отвода кислорода из конденсатора. При большем открытии этого вентиля содержание кислорода в аргонной фракции уменьшается, а при меньшем — повышается.

Когда уровень жидкости в конденсаторе аргонной колонны установится более или менее постоянным, анализируют сырой аргон (см. гл. 14).

При повышении содержания аргона в сыром продукте отбор сырого аргона постепенно увеличивают, доводя до максимального. Выход аргона определяют по показаниям дифманометра. Если данные анализа указывают на уменьшение содержания аргона в получаемом сыром аргоне, то отбор последнего уменьшают до восстановления требуемого содержания аргона. Нормальный режим в аргонной колонне устанавливается через несколько часов после включения ее в работу.

**Обслуживание при установившемся режиме.** В течение длительного времени нормальной работы воздухоразделительного аппарата налаженный и отрегулированный режим работы аргонной колонны должен оставаться без изменения. Для этого необходимо стремиться к сохранению постоянства потоков газа и жидкости в верхней колонне. Сырой аргон должен содержать не более 5% $N_2$ и не более 10% $O_2$, остальное — аргон. Чем ниже содержание кислорода в сыром аргоне, тем экономичнее протекает последующий процесс очистки сырого аргона от кислорода.

Работа аргонной колонны в основном зависит от процесса ректификации в верхней колонне. Увеличение содержания кислорода в отходящем азоте даже на 0,5% приводит к резкому сокращению или полному прекращению выхода аргона вследствие увеличения его потерь с отходящим азотом и изменения распределения аргона по колонне. Изменение на 0,1% концентрации кислорода также может существенно влиять на выход аргона, так как вызывает изменение содержания кислорода в аргонной фракции на 0,8—1

Работу верхней колонны регулируют по составу аргонной фракции таким образом, чтобы отбираемая из нее аргонная фракция содержала 89—91% $O_2$ и чтобы концентрация кислорода в основном конденсаторе составляла 99,2—99,7% при содержании кислорода в отходящем азоте 0,1—0,2%. Это достигается путем регулирования отбора кислорода из основного конденсатора и подачи кубовой жидкости в конденсатор аргонной колонны через соответствующие вентили.



ектификация в верхней колонне при извлечении сырого аргона ственно зависит также от колебания уровня жидкого кислоро- основном конденсаторе и величины сопротивления регенера- в. При значительной разности сопротивлений азотных регене- ров каждое переключение их вызывает заметное изменение ения в верхней колонне, а следовательно, и состава аргонной кции.

ля получения отходящего азота указанного выше оптимально- остава необходимо отрегулировать процесс ректификации так- нижней колонне, чтобы в жидком азоте из карманов конден- ра содержалось 0,2—0,3% $O_2$ при нормальном для данного воз- разделительного аппарата составе кубовой жидкости. Если елительная способность нижней колонны недостаточна для чения в ней указанного состава продуктов ректификации, то печить получение сырого аргона высокой концентрации при до- очно высоком коэффициенте его извлечения из воздуха не ется даже при большом числе тарелок в верхней колонне.

адача регулирования потоков кубовой жидкости сводится к му распределению их между верхней колонной и конденсато- аргонной колонны, при котором достигается наибольший коэф- иент извлечения аргона. Обычно наивыгоднейшее соотношение ду потоками кубовой жидкости устанавливается при первых адочных пусках кислородо-аргонных воздухоразделительных аратов.

одачу кубовой жидкости наиболее удобно регулировать по азанию дифманометра, установленного на потоке пара из кон- сатора аргонной колонны в верхнюю колонну, и по указателю ротивления аргонной колонны. При повышении содержания та в сыром аргоне уменьшается количество паров, образующих- в межтрубном пространстве конденсатора аргонной колонны, одимых в верхнюю колонну, и одновременно падает сопротивле- аргонной колонны.

о время работы воздухоразделительного аппарата могут быть чаи забивки дроссельных вентилей подачи жидкости из нижней онны в верхнюю и в аргонную колонны твердой двуокисью угле- а. В результате распределение жидкости между этими колонна- изменится и повлечет за собой нарушение процесса получения ого аргона. Во избежание этого необходимо периодически «шу- ать» дроссельные вентили на линиях кубовой жидкости. При ышении уровня жидкости в конденсаторе аргонной колонны дует прикрывать вентиль подачи кубовой жидкости в аргонную онну до тех пор, пока ее уровень в конденсаторе не понизится установленной оптимальной величины.

одача в конденсатор аргонной колонны слишком большого ко- ества кубовой жидкости вызывает усиленную конденсацию па- в трубках конденсатора аргонной колонны и переполнение ее елок жидкостью. В результате аргонная колонна начинает «за- ываться», на что указывает увеличение ее сопротивления. Это

явление устраняют, уменьшив подачу кубовой жидкости в конд-
сатор аргонной колонны.

При увеличении содержания азота в сыром аргоне следует п-
дуть аргонную колонну, временно увеличив отбор газа при отк-
ченном газгольдере. Однако такая продувка колонны вызы-
повышение сопротивления аргонной колонны и ее захлебыва-
что может привести к полному расстройству режима получе-
сырого аргона. Поэтому, если сопротивление аргонной колонны
на пределе, лучше уменьшить содержание азота в сыром ар-
путем повышения содержания кислорода в аргонной фракции.

Расстройство режима работы аргонной колонны вследствие
вышенного содержания азота в сыром аргоне объясняется увели-
нием содержания азота в парах, поступающих в конденсатор
гонной колонны. В этом случае разность температур обогащен-
азотом паров и подаваемой в конденсатор кислородной жидко-
уменьшается, вследствие чего снижается и количество конде-
рующихся паров. В результате количество флегмы в аргонной
лонне становится меньше, уровень жидкости в конденсаторе ар-
ной колонны повышается, а сопротивление аргонной колонны
дает. В этом случае необходимо вновь отрегулировать состав
гонной фракции, а затем начать постепенно увеличивать отбор
рого аргона.

Когда уровень жидкости в конденсаторе аргонной коло-
начнет понижаться, необходимо определить состав сырого арг-
По мере увеличения содержания аргона в отводимом газе мо-
уменьшать его отбор до установления наиболее выгодного реж-
работы аргонной колонны.

В случае внезапной остановки аппарата вначале закрывают
тиль подачи кубовой жидкости в конденсатор аргонной колонн-
затем отключают подачу сырого аргона в газгольдер.

В процессе получения сырого аргона контролируют следую-
показатели: выход сырого аргона (в $м^3/ч$); содержание кислоро-
в аргонной фракции (в %); содержание кислорода в сыром арг-
(в %); содержание аргона или азота в сыром аргоне (в %);
держание кислорода в отходящем азоте и кубовой жидкости (в

ГЛАВА 13

# КОНТРОЛЬ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Контроль и регулирование работы машины, аппаратуры и меха-
змов установок разделения воздуха производится для достиже-
я оптимального технологического режима, т. е.
ксимального выхода продуктов разделения установленного каче-
ва при наименьшем удельном расходе электроэнергии и материа-
в.

Контроль технологических параметров—температуры, давления,
схода, уровня и др. осуществляется с помощью показывающих и
гистрирующих приборов, с подачей в необходимых случаях сиг-
алов о возникающих нарушениях процесса.

Контрольные приборы дают возможность вести наблюдения за
оцессами и предупреждать неполадки и аварии. Особенно важно
именение автоматических приборов и устройств, которые незави-
мо от обслуживающего персонала поддерживают заданный ре-
им, включают и выключают оборудование, предупреждают воз-
ожность ошибочных действий персонала.

Во время работы воздухоразделительной установки необходимо
змерять и контролировать приборами: температуру и давление
здуха, кислорода, азота, аммиака, масла, охлаждающей воды;
ровень жидкости в кубе и конденсаторах; сопротивление отдель-
ых аппаратов установки; количества перерабатываемого воздуха
ысокого и низкого давления и получаемого кислорода (азота);
онцентрацию получаемого газообразного и жидкого кислорода и
тходящего азота; содержание кислорода в кубовой жидкости и в
кидком азоте; содержание ацетилена в кубовой жидкости и в кон-
енсаторе; напряжение, силу тока и расход электроэнергии; поло-
жение маховичков расширительных вентилей и др. Число контроли-
руемых параметров зависит от сложности установки, а также воз-
можности оснащения контрольно-измерительными приборами.

Показания приборов и результаты анализов жидкостей и газов
аппаратчик и машинист заносят в цеховые журналы установленной
формы. В журналах фиксируют также причины и продолжитель-
ность остановки аппаратов. Показания самозаписывающих (регист-
рирующих) приборов в журналы не заносят.

Аналитический контроль производства осуществляет заводская (цеховая) лаборатория. При этом определяют:

содержание ацетилена в жидком кислороде из конденсатора кислородного аппарата и из стационарной емкости — по установленному графику, но не реже одного раза в сутки;

содержание двуокиси углерода и влаги в воздухе после блока очистки и осушки воздуха в середине и в конце рабочего периода аппарата;

степень использования раствора щелочи в декарбонизаторе (один раз в 2—3 дня в течение первых 6 дней после заливки, а далее ежедневно), а также крепость раствора щелочи, заливаемого в декарбонизатор; эти анализы в ряде случаев выполняются не только в лаборатории, но и аппаратчиками цеха;

концентрацию кислорода в газгольдере;

давление и концентрацию кислорода в наполненных баллонах, взятых выборочно со склада;

концентрацию кислорода и азота, отводимых из аппарата, один раз в сутки.

Результаты анализов записывают в журнал лаборатории; журнал просматривают начальник цеха и главный инженер кислородного завода.

## 13.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ГАЗА

Количество полученного кислорода определяют по числу наполненных баллонов или показаниям приборов (счетчиков); расход воздуха и других газов определяют с помощью измерительных диафрагм с дифманометрами и газовых счетчиков.

**Учет выработки кислорода по наполненным баллонам.** Выработку кислорода $V_n$ (при стандартных условиях: 20 °C и 760 *мм рт. ст.*) определяют по формуле:

$$V_n = V_1 n K \qquad (13.1)$$

где $V_1$ — объем одного баллона, *дм*³;
$n$ — число баллонов;
$K$ — коэффициент для приведения объема газа к стандартным условиям, учитывающий сжимаемость кислорода, *м*³/*дм*³.

Значение коэффициента $K$ подсчитывают по формуле:

$$K = \frac{293}{273 + t}(0{,}968p + 1)\frac{1}{Z}\cdot 10^{-3} \qquad (13.2)$$

где $t$ — температура газа в баллоне, °C;
$p$ — избыточное давление газа в баллоне, измеренное манометром, *кгс/см*²;
0,968 — коэффициент для пересчета технических атмосфер в физические;
$Z$ — коэффициент сжимаемости кислорода.

Температура газа в баллоне принимается равной температуре окружающей среды, в которой наполненный баллон выдерживают (до измерения давления) не менее 5 *ч*.



Для определения значения коэффициента $K$ можно пользоваться также следующими данными:

| Избыточное давление в баллоне, *кгс/см*² | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Коэффициент $K$ при температуре | | | | | | | | |
| —30 °C | 0,195 | 0,210 | 0,225 | 0,239 | 0,253 | 0,267 | 0,281 | 0,294 |
| —20 °C | 0,182 | 0,195 | 0,209 | 0,222 | 0,235 | 0,248 | 0,261 | 0,273 |
| —10 °C | 0,171 | 0,183 | 0,195 | 0,208 | 0,220 | 0,232 | 0,244 | 0,255 |
| 0 °C | 0,161 | 0,172 | 0,184 | 0,196 | 0,207 | 0,219 | 0,229 | 0,240 |
| +10 °C | 0,153 | 0,163 | 0,174 | 0,185 | 0,196 | 0,206 | 0,217 | 0,227 |
| +20 °C | 0,145 | 0,156 | 0,166 | 0,176 | 0,186 | 0,196 | 0,206 | 0,215 |
| +30 °C | 0,139 | 0,148 | 0,158 | 0,168 | 0,177 | 0,187 | 0,196 | 0,206 |
| +40 °C | 0,133 | 0,142 | 0,151 | 0,160 | 0,170 | 0,178 | 0,188 | 0,196 |

**Примеры:** 1. Температура кислорода в баллонах емкостью 40 *дм*³ равна 20 °C, а давление по манометру 150 *кгс/см*²; число баллонов $n = 10$.
Тогда

$$V_n = 40\cdot 10\cdot 0{,}156 = 62{,}4\ м^3$$

2. Температура кислорода в баллонах емкостью 40 *дм*³ равна —10 °C, а давление по манометру 140 *кгс/см*²; число баллонов $n = 5$.
Тогда

$$V_n = 40\cdot 5\cdot 0{,}171 = 34{,}2\ м^3$$

Количество криптона, криптоно-ксеноновой смеси и ксенона в баллоне определяют взвешиванием его до и после наполнения. Допускаемая погрешность взвешивания: для средних баллонов ±0,1%, для малых баллонов ±0,05%. Количество газа в баллоне $V$ (в *м*³ при стандартных условиях) подсчитывают по формуле:

$$V = \frac{G_1 - G}{\rho}$$

где $G_1$ — масса баллона после наполнения, *кг*;
$G$ — масса баллона до наполнения, *кг*;
$\rho$ — плотность газа, *кг/м*³.

Плотность криптона (в *кг/м*³ при стандартных условиях) принимают равной 3,49, ксенона — 5,45 *кг/м*³.

Плотность криптоно-ксеноновой смеси вычисляют по формуле:

$$\rho = 0{,}01\,(3{,}49x_1 + 5{,}45x_2)$$

где $x_1$ и $x_2$ — содержание криптона и ксенона в смеси, %.

**Измерительные диафрагмы.** Измерительная диафрагма представляет собой тонкий диск, в середине которого имеется отверстие с острыми краями; диафрагму устанавливают на трубопроводе между двумя фланцами. При прохождении газа или жидкости через диафрагму *2* (рис. 13.1), диаметр отверстия которой всегда меньше диаметра трубопровода *1*, поток вещества сужается, вследствие чего давление перед диафрагмой повышается, а за диафраг-

мой снижается. Чем больше газа или жидкости проходит через диафрагму, тем большей будет разность давлений до и после диафрагмы. Расход газа или жидкости определяют по этой разности давлений, измеренной дифманометром.

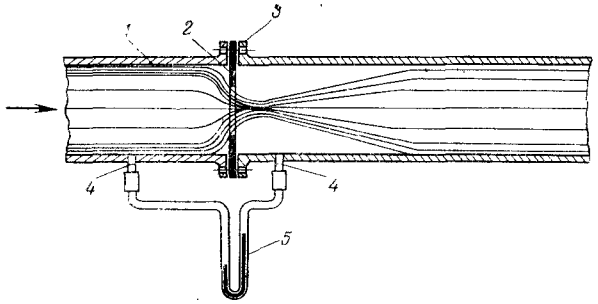



Рис. 13.1. Измерительная диафрагма:
*1* — трубопровод; *2* — диафрагма; *3* — фланцы; *4* — отборные трубки; *5* — дифференциальный манометр.

Количество газа $Q$ (в $м^3/сек$), протекающее через диафрагму, равно

$$Q = cF \qquad (13.$$

где $c$ — скорость газа, *м/сек*.
$F$ — площадь сечения отверстия диафрагмы, $м^2$.

Скорость газа определяют по формуле:

$$c = \alpha \sqrt{2g\frac{h}{\rho}} \qquad (13.$$

где $\alpha$ — коэффициент расхода газа, зависящий от ряда условий и определяемый по таблицам;
$g$ — 9,81 $м/сек^2$;
$h$ — разность давлений до и после диафрагмы, *мм вод. ст.*;
$\rho$ — плотность газа, $кг/м^3$.

Обычно для каждой диафрагмы и газа составляют график (кривые), по которым определяют расход газа (в $м^3/сек$ или $м^3/ч$) соответствующий измеренной разности давлений. Иногда шкалу дифманометра градуируют не в миллиметрах водяного столба, обозначают на ней соответствующий расход газа в $м^3/ч$, что упрощает контроль. Точность измерения расхода газа диафрагмами составляет ±3% при условии, что перепад давления на диафрагме равняется приблизительно 200 *мм вод. ст.*, а отношение диаметра отверстия диафрагмы к внутреннему диаметру трубопровода составляет от 1 : 2 до 1 : 2,5.

Диафрагмы применяют на трубопроводах диаметром не менее 50 *мм;* их устанавливают на прямолинейных участках так, чтобы острый край располагался со стороны подвода газа. Соединение диафрагмы с трубами, а также отборных трубок с трубами и



дифманометром должны быть герметичны, так как даже незначительный пропуск существенно снижает точность измерений*.

**Газовые расходомеры.** В комплект расходомера для измерения количества газов входят диафрагмы, мембранные дифманометры с индукционными датчиками (см. ниже) и вторичные приборы.

Показания дифманометров через индукционную систему передаются на вторичный прибор, который имеет указывающее и записывающее устройство, а также интегратор (счетчик); шкала градуирована в единицах расхода газа ($м^3/ч$ или $м^3/мин$); перо вычерчивает кривую расхода газа на диаграмме или ленте, которая перемещается с помощью часового механизма. В качестве самописца используется вторичный показывающий, регистрирующий и суммирующий прибор ДС1-05.

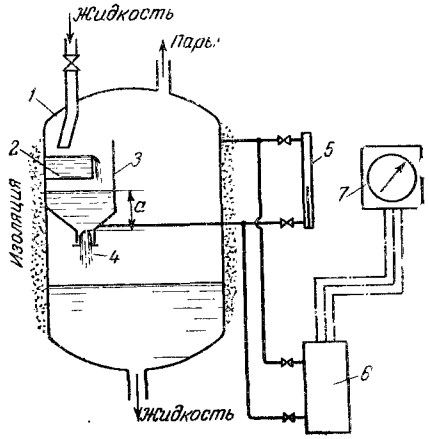



Рис. 13.2. Схема соплового расходомера жидкого кислорода и жидкого азота:
*1* — сборник; *2* — приемник жидкости; *3* — мерный бачок; *4* — калиброванное сопло; *5* — указатель уровня; *6* — поплавковый датчик; *7* — регистрирующий прибор.

Расход жидкого кислорода и жидкого азота также измеряется с помощью диафрагм или сопел. На рис. 13.2 показана схема измерения количества жидких газов с помощью соплового расходомера. Жидкий кислород (азот) сливается в сборник *1* через мерный бачок *3*, снабженный калиброванным соплом *4* и приемником *2* жидкости для успокоения потока. Высота столба *a* жидкости в бачке *3* пропорциональна ее расходу и измеряется указателем уровня *5*. Давление столба *a* жидкости может передаваться на поплавковый датчик *6*, который соединен со вторичным указывающим и регистрирующим прибором *7;* прибор снабжен суммирующим счетчиком и устанавливается на щите управления.

## 13.2. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Избыточное давление измеряется обычно манометрами с пружиной, представляющей собой стальную изогнутую трубку овального сечения; для кислородных манометров трубка изготовляется из латуни. Один конец трубки впаян в штуцер, к которому подводится контролируемое давление. Второй конец трубки запаян наглухо и соединен через рычаг, зубчатый сектор и шестеренку со стрелкой. Чем выше давление газа, тем больше стремится трубчатая пружи-

* Правила 28—64 измерения расхода жидкостей, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами, Изд. «Стандарты», 1964.

на разогнуться и тем сильнее стрелка отклоняется в правую сторону, указывая при этом на шкале соответствующее давление.

Манометры кислородных установок имеют по ГОСТ 2405—63 шкалы на максимальные давления от 1 до 300 *кгс/см²*.

Перепад (разность) давлений в измерительных диафрагмах измеряется мембранными дифманометрами типа ДМ.

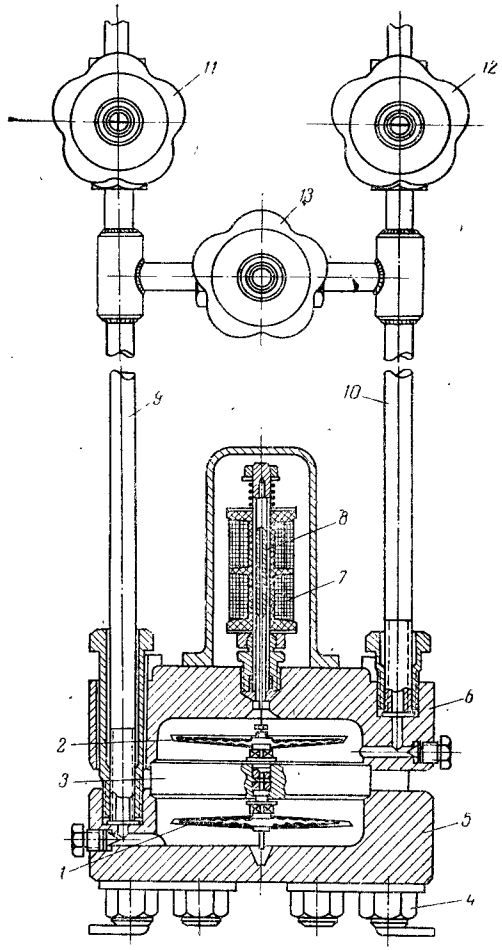



Рис. 13.3. Дифманометр мембранный:

*1, 2* — мембранные коробки; *3* — разделительная диафрагма; *4* — болты; *5, 6* — крышки; *7* — индукционная катушка; *8* — сердечник; *9, 10* — импульсные трубки; *11, 12* — запорные вентили; *13* — уравнительный вентиль.

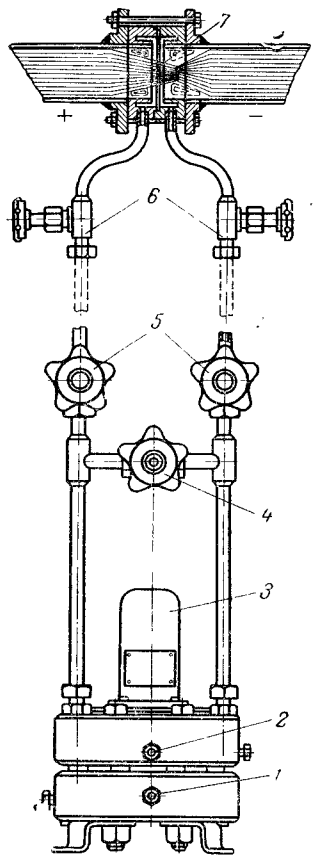



Рис. 13.4. Схема установки мембранного дифманометра в комплекте с измерительной диафрагмой:

*1, 2* — клапаны нижней и верхней камер; *3* — индукционная катушка; *4* — уравнительный вентиль; *5, 6* — запорные вентили; *7* — измерительная диафрагма.



Чувствительным элементом дифманометра ДМ (рис. 13.3) является мембранный блок, состоящий из двух мембранных коробок *1* и *2*, ввернутых с обеих сторон в разделительную диафрагму *3*. Диафрагма расположена между крышками *5* и *6*, стянутых болтами *4*. Мембраны коробок *1* и *2* сварены таким образом, что направление их гофр совпадает. Внутренние полости коробок сообщаются друг с другом через отверстие в диафрагме; они заполняются дистиллированной водой, после чего ниппель, через который заливают воду, заваривается. Мембраны изготавливаются из нержавеющей стали ЭИ-702, фосфористой или бериллиевой бронзы. Плюсовое давление (до измерительной диафрагмы) подводится в нижнюю камеру, а минусовое (после измерительной диафрагмы) — в верхнюю камеру мембранного блока; для этого служат импульсные трубки *9* и *10*.

Под действием разности давлений нижняя мембранная коробка сжимается и жидкость из нее перетекает в верхнюю коробку, что вызывает перемещение верхнего центра, с которым связан сердечник *8* в индукционной катушке *7*. Катушка соединена проводами по дифференциально-трансформаторной схеме с катушкой вторичного прибора. Перемещение сердечника *8* катушки *7* вызывает соответствующее перемещение якоря катушки вторичного прибора, и на шкале его указывается расход газа. Схема установки мембранного дифманометра в комплекте с измерительной диафрагмой показана на рис. 13.4. При измерении расхода кислорода дифманометры перед установкой должны быть обезжирены, а сальники их вентилей набиты прокаленным прографиченным асбестом. В этом случае разделительные сосуды к дифманометрам не требуются.

Такие приборы могут применяться при избыточном давлении до 150 *кгс/см²* и разности давлений от 0,4 до 6,3 *кгс/см²*.

В качестве записывающих приборов давления применяются регистрирующие манометры. Предельные значения давления сигнализируются контактными манометрами типа ЭКМ.

## 13.3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

В зависимости от пределов измеряемой температуры и доступности мест замеров применяются различные приборы.

**Жидкостные термометры.** Температуры выше нуля, а также до минус 20 °С измеряют стеклянными термометрами, наполненными спиртом, а до минус 150 °С, — наполненными изопентаном*.

Однако такой визуальный контроль температуры в точке ее измерения недостаточен для современных установок, особенно крупных. В этих случаях применяют термопары или термометры сопротивления, с помощью которых можно дистанционно контролировать температуру в разных местах аппаратуры.

* Изопентан, $(CH_3)_2\ CHCH_2CH_3$, — жидкий углеводород, получаемый из нефти.

**Термопары.** В месте спая двух проволок из разных металлов при охлаждении или нагревании возникает электродвижущая сила (э. д. с.), что можно обнаружить, подключив два свободных конца проволоки к чувствительному прибору для измерения электрического тока — гальванометру (милливольтметру). По этому принципу и работает термопара.

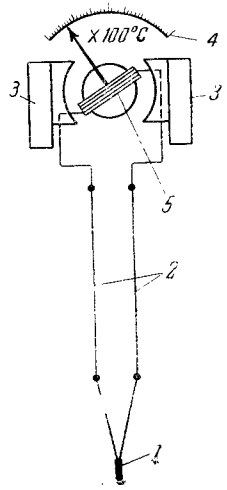



Рис. 13.5. Схемы включения термопары:

*1* — спай термопары; *2* — провода; *3* — постоянные магниты гальванометра; *4* — шкала гальванометра; *5* — подвижная рамка сердечника с катушкой.

Система из двух спаянных проволок разных металлов с выводами для подсоединения к прибору называется *термопарой* (рис. 13.5).

Для измерения низких температур применяют термопары из медной и константановой проволоки, имеющие два спая. Один спай помещают в место измерения температуры, а другой — в сосуд с льдом. Термопары с двумя спаями называют *разностными*, так как показывают разность между температурой таяния льда (0 °C) и контролируемой.

Термопары градуируются в пределах измеряемых температур, а шкала гальванометра (милливольтметра) — в градусах стоградусной шкалы или в милливольтах. В последнем случае для определения температуры пользуются графиками, с помощью которых показания милливольтметра переводят в градусы.

**Термометры сопротивления.** Эти приборы-датчики наиболее широко применяются для измерения сравнительно низких температур. Действие их основано на свойстве металлических проводников изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от температуры. При повышении температуры сопротивление проводника возрастает, а при понижении падает. Измеряя электрическое сопротивление проводника, можно определить его температуру, а следовательно, и температуру той среды, в которую помещен проводник.

Конструкция термометра сопротивления показана на рис. 13. Чувствительным элементом термометра является катушка из тонкой (диаметром 0,05—0,07 *мм*) платиновой или медной проволоки, намотанной на стержень или полоску из изоляционного материала (слюды, кварцевого стекла); катушка укреплена на каркасе, который размещается в чехле (трубке) термометра. Отводы от катушки выведены в головку (или присоединены непосредственно к прибору) для подключения к прибору. Термометры сопротивления с медной спиралью применяются для измерения температур от минус 50 до плюс 100 °C, а с платиновой — для измерения более низких и более высоких температур. Применяются низкотемпературные платиновые термометры сопротивления ТСП-23 и малоинерционные термометры ТСП-25, ТСП-037К и ТСП-0120. Для измерения высоких температур служат термометры ТСП-1 и ТСП-047М. Пределы измеряемых температур следующие:

| Термометр | ТСП-037К | ТСП-0120 | ТСП-047М |
|---|---|---|---|
| Температура, °C | От —220 до +120 | От —220 до +150 | От —50 до +250 |

Величина сопротивления термометров измеряется логометрами или электронными мостами.

Измерение температуры (сопротивления) логометром основано на взаимодействии поля постоянного магнита с магнитными полями двух рамок подвижной системы прибора.

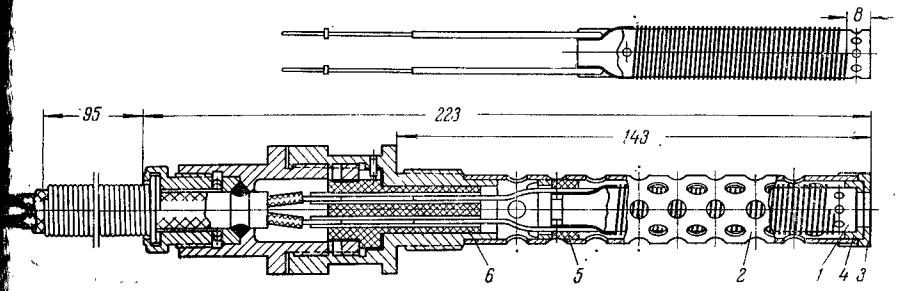



Рис. 13.6. Малоинерционный термометр сопротивления:

*1* — чувствительный элемент; *2* — перфорированный чехол; *3* — колпачок; *4* — нижний упор; *5* — верхний упор; *6* — изолятор.

На рис. 13.7 приведена схема*, поясняющая принцип действия логометра с присоединенным термометром сопротивления. Основой измерения является мостовая схема; в плечи моста включены постоянные сопротивления $R_1$, $R_2$, $R_3$ из манганина** и термометр $R_т$, сопротивление которого изменяется в зависимости от температуры в месте измерения. Одна диагональ измерительного моста включена в цепь питания постоянным током от аккумулятора *3* напряжением 3 *в* или от источника сетевого питания. В другую диагональ моста включены обмотки *1* и *2* двух рамок, расположенных под углом 22° друг к другу и находящихся на одной оси; эти рамки размещены между полюсами подковообразного постоянного магнита. Сопротивления $R_д$ и $R_э$ служат для подгонки внешнего сопротивления (проводов) до определенного значения и являются образцовыми для проверки прибора. Сопротивления $R_4$ и $R_5$ служат для компенсации температурной погрешности прибора и изменения угла отклонения подвижной системы.

---

* На рисунке показана двухпроводная система присоединения термометра; в трехпроводной системе минусовый полюс источника тока присоединяется к термометру.

** Манганин — сплав меди, содержащий 84% меди, 4% никеля и 12% марганца, обладающий высоким удельным сопротивлением, мало зависящим от температуры.

На одной оси с рамками посажена стрелка, перемещающаяс по шкале прибора. Если включить прибор в сеть, то через обмотк рамок в горизонтальной диагонали пойдут токи различной величи ны. Вследствие этого вокруг рамок возникают магнитные поля, ко торые во взаимодействии с полем магнита создают вращающи момент, и стрелка будет перемещаться по шкале прибора до те пор, пока не наступит равновесие между вращающими моментам

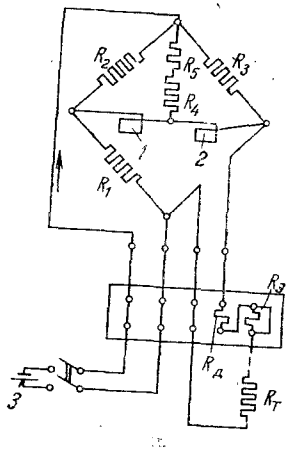



Рис. 13.7. Принципиальная схема логометра:

*1, 2* — обмотки рамок; *3* — источник питания (аккумулятор); $R_1$, $R_2$ и $R_3$ — постоянные сопротивления моста; $R_4$, $R_5$ — компенсационные сопротивления; $R_т$ — термометр сопротивления, $R_д$, $R_э$ — сопротивления для подгонки внешнего сопротивления цепи.

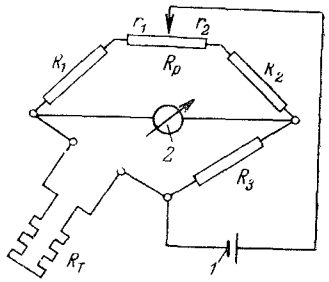



Рис. 13.8. Принципиальная схема уравновешенного моста:

*1* — источник питания; *2* — измерительный прибор (нуль-прибор); $R_т$ — термометр сопротивления; $R_1$, $R_2$ и $R_3$ — постоянные сопротивления моста; $R_р$ — сопротивление реохорда; $r_1$, $r_2$ — сопротивления.

рамок в магнитном поле. В этот момент стрелка покажет темпера туру среды, в которой расположен термометр сопротивления $R$. С помощью логометра можно измерять температуру во многих м стах, последовательно присоединяя разные термометры сопроти ления через многопозиционные переключатели типа ПМТ. Повор том ручки переключателя к логометру подключают тот термомет сопротивления, показания которого необходимо знать в данный м мент.

В качестве вторичных указывающих приборов применяются л гометры типа ЛПР-53Д с двойной шкалой для интервала темпер тур от 50 до минус 200 °С.

Для дистанционного измерения температур в блоках разделен воздуха (от минус 220 до плюс 80 °С), в турбокомпрессорах (от



до 250° С), обмоток и железа в электродвигателях (от минус 50 до плюс 150 °С) применяется двенадцатиточечный показывающий малогабаритный логометр типа ЛПр-017М.

Наряду с логометрами используются и уравновешенные мосты (когда необходимы запись показаний, сигнализация и регулирование). В вертикальную диагональ моста (рис. 13.8) включен источник питания *1*, а в горизонтальную — измерительный электрический прибор *2* (нуль-прибор). Каждому значению температуры среды, в которой расположен термометр сопротивления, будет соответствовать определенная величина его сопротивления $R_т$. При этом для сбалансирования измерительного моста в момент определения температуры требуется определенное положение контакта движка на сопротивление реохорда $R_р$, которому соответствуют величины сопротивлений $r_1$ и $r_2$. Движок реохорда связан со стрелкой, перемещающейся по шкале прибора, отградуированной в значениях температуры.

Используются автоматические электронные уравновешенные мосты ЭМД, ЭМП, АСМ, МСР и др. с записью показаний на дисковой диаграмме или рулонной ленте. Для воздухоразделительных установок применяют специальные автоматические мосты МСР-0184, МСР-029* с автоматическим переключением пределов измерений, позволяющие измерять температуру платиновыми термометрами сопротивления с сопротивлением 46 *ом* (при 0 °С) — в пределах от 0 до 100 °С и с сопротивлением 100 *ом* — в пределах минус 70 — минус 220 °С. Это одноточечные приборы, предназначенные для автоматического измерения, записи, регулирования и сигнализации о достижении заданных значений температуры с высокой точностью.

Питание прибора производится от сети переменного тока напряжением 220 *в*. Измерительная схема прибора питается постоянным током от выпрямителя, вмонтированного в прибор. Возникающее в измерительной диагонали напряжение разбаланса увеличивается электронным усилителем до величины, достаточной для вращения реверсивного электродвигателя, перемещающего движок по реохорду до наступления момента равновесия в измерительном мосту. С движком реохорда через систему передач связана каретка с указателем и пером, вычерчивающим на диаграмме кривые изменения температуры.

**Манометрические термометры.** Для измерения низких температур в пределах минус 183 — минус 143 °С (от 90 до 130 °К) иногда применяют манометрические термометры. Действие этих приборов основано на уменьшении давления газа при охлаждении его в трубке постоянного объема. Манометрический термометр (рис. 13.9) со-

* Автоматический мост МСР-029 предназначен для особо точного измерения, записи, сигнализации и регулирования температуры в промышленных условиях и при лабораторных работах.

стоит из точного (контрольного) пружинного манометра *4*, у кото рого деления шкалы выражены в градусах Кельвина. В штуцер манометра впаяна длинная трубка (капилляр) *3* из отожженной красной меди (наружный диаметр трубки 3 *мм*, внутренний 2 *мм*). Другой конец трубки впаян в полую латунную гильзу (термопатрон) *1*. Трубки, гильза и пружина манометра через отросток *2* заполнены чистым сухим кислородом при избыточном давлении 50 *кгс/см*² и температуре 30 °С, после чего отросток запаивается.

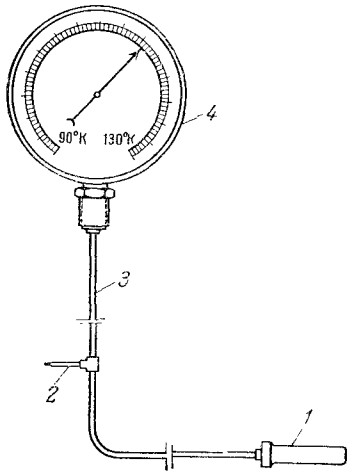



Рис. 13.9. Манометрический термометр:
*1* — гильза; *2* — отросток; *3* — трубка (капилляр); *4* — манометр.

Гильзу *1* помещают в то место аппарата, где необходимо измерить температуру (например, в трубопровод до и после турбодетандера), а манометр устанавливают снаружи кожуха, на щите блока разделения. При охлаждении гильзы находящийся в ней кислород также охладится и при этом объем его уменьшится (иногда кислород при охлаждении гильзы переходит частично в жидкое состояние). В связи с охлаждением давление газа в трубке понизится, и стрелка продвинется влево. При нагревании гильзы давление кислорода в ней возрастает, и стрелка пойдет вправо.

Изменение давления кислорода в зависимости от температуры выражается следующими величинами:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Температура, °К . . . . . | 90 | 95 | 100 | 105 | 110 | 120 | 13 |
| Избыточное давление, *кгс/см*³ . . . . | 0 | 0,61 | 1,55 | 2,8 | 4,49 | 9,45 | 17, |

Для правильной работы прибора необходима полная герметичность соединений, так как при пропуске в трубке или местах пайки прибор выходит из строя.

Приборостроительная промышленность выпускает манометрические термометры и более сложной конструкции — с двумя спиральными трубчатыми пружинами, заполненными жидкостью или газом и связанными передаточным механизмом с указывающей стрелкой прибора. Для заполнения капиллярных трубок и пружин манометрических термометров, в зависимости от пределов измеряемых температур, применяются различные жидкости и газы: ртуть, ксилол, метиловый спирт, метилхлорид, этилхлорид, ацетон, азот и др. Погрешность измерения этих приборов лежит в пределах ±1,5% максимального значения шкалы.



## 13.4. КОНТРОЛЬ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

**Жидкостные указатели.** Эти указатели просты в изготовлении, широко применяются, хотя и не являются достаточно совершенными приборами.

Действие указателя основано на принципе сообщающихся сосудов (рис. 13.10). В корпус *1* указателя вставлены трубки *2* и *3*; корпус разделен перегородкой *4* на две части. Трубка *2* соединена с верхней частью и через нее — с газовым пространством резервуара *6*, в котором определяется уровень жидкости, а трубка *3* через нижнюю часть корпуса соединена с нижней частью резервуара. Корпус *1* и трубки *2* и *3* заполнены подкрашенной водой; сбоку имеется стеклянная трубка *5*. Вода в трубке *2* и трубке *5* находится на одной и той же высоте *A* (сообщающиеся сосуды). Жидкостный указатель уровня является прибором дистанционного действия.

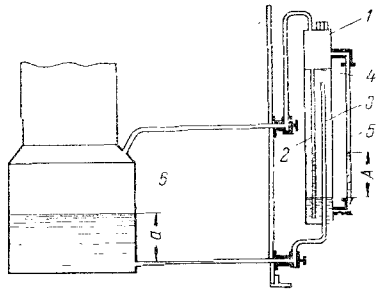



Рис. 13.10. Схема действия указателя уровня жидкости:
*1* — корпус; *2*, *3* и *5* — трубки; *4* — перегородка; *6* — резервуар.

Жидкий кислород (азот или воздух), проходя из резервуара *6* по трубке *3* в корпус *1*, испаряется. Образующийся пар создает в нижней части корпуса давление, равное давлению столба *a* жидкости в резервуаре; давление пара не может быть выше давления столба *a*, так как в этом случае избыток пара выйдет пузырьками через слой жидкости в резервуаре. Этим давлением часть воды из корпуса *1* вытесняется в трубку *2* и трубку *5* до высоты *A*. Таким образом, высота *A* уровня пропорциональна высоте столба *a* жидкости в резервуаре *6*. Если плотности жидкостей в резервуаре и в корпусе *1* равны, то $A=a$. Во всех остальных случаях высота столба больше у той жидкости, плотность которой меньше. При изменении высоты столба *a* жидкости в резервуаре соответственно будет изменяться и высота *A* столбика жидкости в указателе.

Указатели уровня жидкого кислорода заполняют тяжелой негорючей жидкостью: тетрабромэтаном ($C_2H_2Br_4$; плотность 2,96 *г/см*³; температура замерзания 0,13 °С; температура кипения 151 °С) или метиленбромидом ($CH_2Br_2$; плотность 2,5 *г/см*³; температура замерзания минус 52,5 °С; температура кипения 98 °С).

При использовании метиленбромида необходимо учитывать, что он токсичен и разъедает резиновые прокладки и шланги.

Указатель дает правильные показания уровня жидкости только в том случае, если она полностью испаряется в нижней трубке до поступления в цилиндр указателя. Поэтому необходимо следить за тем, чтобы нижняя трубка была проложена в изоляции аппарата

строго горизонтально до выхода ее в более теплые слои изоляции. В теплом слое изоляции эту трубку дополнительно изгибают в виде петли, которая располагается также в горизонтальной плоскости, и в ней жидкость испаряется полностью. После петли трубку можно вести в любом направлении и указатель можно устанавливать на любом уровне по отношению к уровню жидкости в сосуде. Если же по выходе из сосуда нижнюю трубку сразу опустить вниз, указатель покажет уровень жидкости выше, чем он есть в сосуде. Все соединения в указателе и трубки должны быть абсолютно герметичными.

Схема разводки импульсных трубок к указателям уровня и газоанализаторам в кожухе блока разделения воздуха показана на рис. 13.11.

Указатель уровня снабжен шкалой с делениями через 1 *см*. На шкале указателей цистерн для жидкого кислорода деления нанесены в кубических метрах и показывают количество жидкости, пересчитанное на соответствующий объем газа, приведенный к температуре 20 °С и давлению 760 *мм рт. ст.* На некоторых емкостях

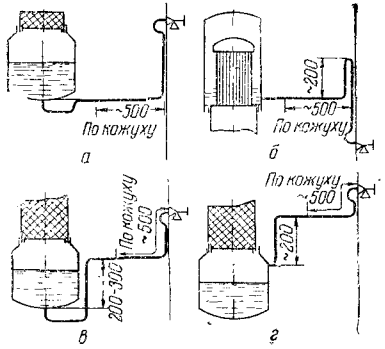



Рис. 13.11. Схема разводки импульсных трубок к указателям уровней и газоанализаторам:

*а* — вывод жидкостных трубок к указателю уровня (вентиль выше точки отбора); *б* — то же (вентиль ниже точки отбора); *в* — вывод жидкостных трубок для анализа; *г* — вывод газовых трубок для анализа.

шкалы указателей уровня жидкости градуированы в тоннах. В табл. 13.1 перечислены основные неисправности, возникающие при работе указателей уровня, и способы их устранения.

На работающем аппарате указатель включают путем медленного открывания его запорных вентилей: сначала верхнего, а затем нижнего. При выключении указателя вентили закрывают в обратной последовательности.

**Мембранные указатели.** В стационарных и передвижных цистернах применяют также мембранные указатели уровня жидкого кислорода и жидкого азота.

В этих дистанционных приборах использован принцип измерения давления столба жидкости в цистерне на мембранную коробку, крышка которой при этом выгибается. Прогиб мембранной коробки передается с помощью механизма стрелке, указывающей на циферблате количество жидкости в цистерне, выраженное в килограммах или тоннах.



Таблица 13.1. **Неисправности указателя уровня жидкости и способы их устранения**

| Неисправность | Причина | Способ устранения |
|---|---|---|
| Поднимающаяся в стеклянной трубке жидкость содержит воздушные пузырьки | 1. Негерметичность соединений в верхней части указателя | 1. Найти неплотность с помощью мыльной воды и устранить пропуск. При сильном пропуске отключить указатель от аппарата |
| | 2. Закупорка верхней подводящей трубки указателя вследствие попадания влаги или твердой двуокиси углерода в холодную часть трубки | 2. Отключить указатель и продуть подводящую трубку сухим азотом или воздухом из баллона через редуктор |
| Проскакивание отдельных пузырьков газа через жидкость, находящуюся в стеклянной трубке | 1. Недостаток воды в указателе | 1. Добавить в стеклянную трубку указателя воду |
| | 2. Переполнение жидкостью конденсатора или испарителя аппарата | 2. Слить избыток жидкости из аппарата |
| Жидкость в стеклянной трубке не поднимается или поднимается слишком медленно | 1. Негерметичность нижней части указателя | 1. Отключить указатель и устранить пропуск |
| | 2. Пропуск газа между верхним и нижним пространством указателя | 2. Снять указатель, распаять его и устранить дефект |
| | 3. Закупорка нижней подводящей трубки указателя твердой двуокисью углерода или льдом | 3. Отключить указатель и продуть подводящую трубку сухим воздухом или азотом из баллона через редуктор. В случае необходимости попытаться отогреть ее при первой возможности |

Схема мембранного указателя уровня приведена* на рис. 13.12. Герметически закрытый корпус *3* прибора сообщается с верхней частью цистерны *1* через трубку *2*, а внутренняя часть мембранной коробки *10* прибора соединена трубкой *6* с нижней частью цистерны. Давление внутри мембранной коробки всегда больше давления в корпусе на величину давления, создаваемого столбом *А* жидкости в цистерне. Под действием этой разности давлений верхняя стенка коробки *10* выгибается вверх. Крышка коробки тягой *5* соединена с осью *4*, на которой укреплен зубчатый сектор *8*. Этот сектор сцеплен с шестерней *9*, на оси которой находится стрелка *7*. Когда высота столба *А* жидкости увеличивается, крышка мембранной коробки выгибается вверх и, поворачивая ось с сектором, вращает шестерню. При этом стрелка отклоняется вправо, показывая на

* Для большей ясности цистерна и указатель уровня на схеме изображены в разных масштабах.

шкале *11* количество жидкости в цистерне (в *T*), соответствующе высоте столба *A*.

Дистанционное измерение уровня жидкого кислорода и жидко го азота можно также производить индукционными дифманометра

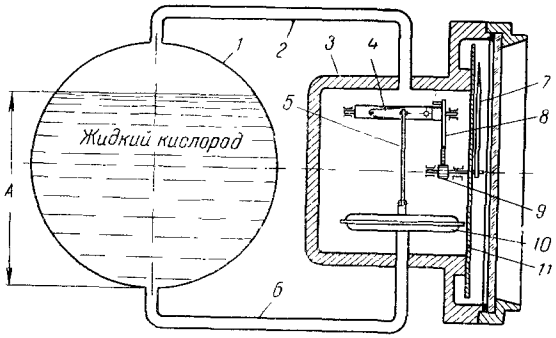



Рис. 13.12. Схема мембра ного указателя уров жидкости:

*1* — цистерна; *2*, *6* — трубки *3* — корпус; *4* — ось; *5* — т га; *7* — стрелка; *8* — зубчаты сектор; *9* — шестерня; *10* — к робка мембранная; *11* — шкал

ми через газовую буферную подушку (при измерении уровня жи кого кислорода или обогащенного кислородом воздуха).

## 13.5. АНАЛИЗ ГАЗОВ

**Определение концентрации кислорода.** Концентрацию кислор да определяют методом Гемпеля, основанным на поглощении О медью в медноаммиачном растворе*.

Для проведения анализа применяют газоанализатор кислород ГК-1 (ГОСТ 8549—67), показанный на рис. 13.13,*а*. Пипетку *6* за полняют спиралями из медной проволоки (ГОСТ 859—66) диаме ром 0,8 *мм* (длина спиралей около 10 *мм*, диаметр витка 5 *мм* В склянку *8* заливают дистиллированную воду. Измерительная бю ретка *1* имеет градуированную шкалу до 100% $O_2$ (с ценой делени на участке шкалы от 98 до 100%, равной 0,05%) и допускаемы отклонением от нормальной вместимости бюретки ±0,05% $O_2$. Хо анализа подробно описан в ГОСТ 5583—68 на «Кислород газоо разный технический и медицинский».

Для анализа кислорода высокой концентрации (около 99,9% прибор ГК-1 снабжается калиброванным капилляром *5* (с рис. 13.13, *б*) с делениями 0,005 или 0,01 *мл*.

**Автоматические термомагнитные кислородные газоанализато ры непрерывного действия.** В производстве кислорода применяют также газоанализаторы для непрерывного определения содержан кислорода в газах. Кислород из всех применяемых в промышле

* Медноаммиачный раствор, согласно ГОСТ 5583—68, готовят следующ образом: 750 *г* хлорида аммония (ГОСТ 3773—60) растворяют в 1 *дм*³ дистил рованной воды (ГОСТ 6709—53) и добавляют 1 *дм*³ 18%-ного водного раство аммиака (ГОСТ 3760—64).



ности газов обладает достаточно высокой магнитной восприимчивостью, в 150 раз большей, чем у азота, водорода и других газов. При внесении кислорода в магнитное поле его молекулы намагничиваются и начинают притягиваться магнитом. Магнитная восприимчивость кислорода сильно зависит от температуры; с повышением температуры она резко снижается.

Принцип действия термомагнитного анализатора кислорода показан на рис. 13.14. Камера *1*, расположенная между магнитными полюсами *2*, заполняется кислородом. В ней помещена нагревательная спираль *3* из платиновой проволоки диаметром 0,05 *мм;* сопро-

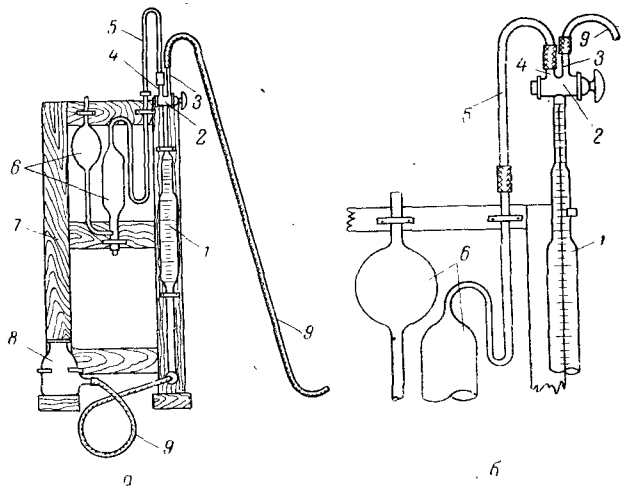



Рис. 13.13. Газоанализатор кислорода ГК-1:

*а* — общий вид; *б* — с калиброваным капилляром для анализа кислорода высокой чистоты; *1* — бюретка; *2* — кран двухходовой; *3*, *4* — отростки крана; *5* — капиллярная трубка; *6* — пипетка; *7* — штатив; *8* — уравнительная склянка; *9* — трубка резиновая.

тивление проволоки предварительно точно измерено. Под действием магнитного поля более холодные молекулы кислорода, находящиеся у стенок камеры, начинают притягиваться к магниту, а молекулы газа, располагающиеся около спирали, как более нагретые, намагничиваются в меньшей степени и поэтому выталкиваются из магнитного поля более холодными частицами газа. В результате около поверхности спирали образуется непрерывный поток (конвекция) газа, охлаждающий нагревательный элемент.

Степень охлаждения элемента можно определить по уменьшению сопротивления спирали: чем сильнее поток газа, тем больше охлаждается спираль и тем меньше ее сопротивление. Если в камере находится не чистый кислород, а смесь кислорода и азота, то, поскольку лишь кислород обладает магнитными свойствами, интенсивность движения газа в камере будет зависеть только от содержания кислорода в смеси. Чем больше в ней кислорода, тем

сильнее циркуляция газа в камере, тем сильнее охлаждается спираль и тем меньше ее сопротивление.

Существует несколько типов термомагнитных анализаторов кислорода. На рис. 13.15 приведена схема термомагнитного газоанализатора МГК-4. Анализируемый газ при постоянном давлении, которое поддерживается регулятором давления *1*, и с постоянной скоростью, контролируемой ротаметром *2*, поступает в стеклянную кольцевую камеру *3*, где разветвляется на два потока. В середине кольца расположена в виде перемычки вертикальная измерительная тонкостенная трубка с тонкой платиновой обмоткой — спиралью. Обмотка состоит из двух секций $R_1$ и $R_2$, которые составляют рабочие плечи измерительного моста. Другие два постоянных плеча моста ($R_3$ и $R_4$) расположены вне камеры. Спираль нагревается до 100—200 °С, и кислород втягивается в трубку сверху вниз. В трубке возникает конвекция газа и спираль охлаждается, что приводит к изменению сопротивления рабочих плеч моста: первое по ходу газа плечо охлаждается, и его сопротивление падает, а второе — нагревается, и его сопротивление возрастает. В результате этого возникает разбаланс измерительного моста пропорционально содержанию кислорода. Напряжение разбаланса подается на стандартный вторичный прибор *ВП* — электронный потенциометр, шкала которого градуирована в процентах кисло

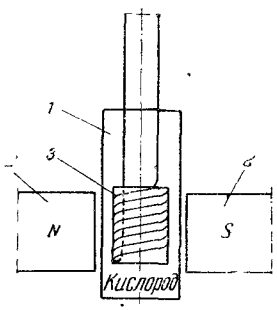



Рис. 13.14. Принцип действия термомагнитного кислородного газоанализатора:

*1* — камера; *2* — магнитные полюса; *3* — нагревательная спираль.

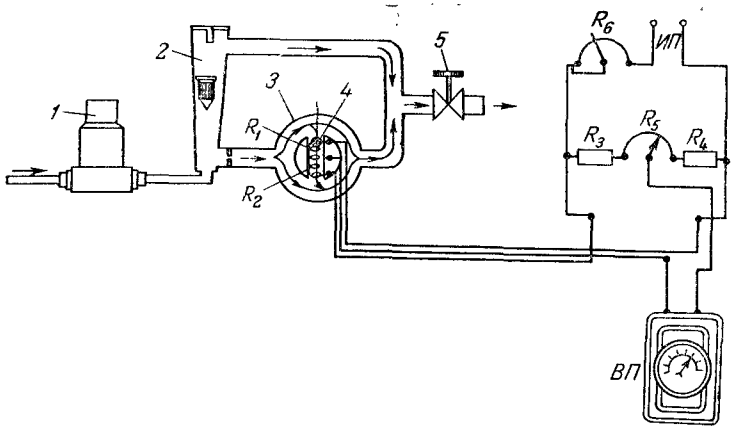



Рис. 13.15. Принципиальная схема термомагнитного газоанализатора МГК-4

*1* — регулятор абсолютного давления; *2* — ротаметр; *3* — кольцевая газовая камера; *4* — магнитный наконечник; *5* — игольчатый вентиль; $R_1$, $R_2$ — рабочие плечи моста; $R_3$, $R_4$ — постоянные плечи моста; $R_5$ — реохорд; $R_6$ — реостат; *ИП* — источник питания; *ВП* — вторичный прибор.



да. Питание прибора током производится от стабилизированного точника питания *ИП* типа СИП-5, подключаемого к сети переенного тока. Установка прибора на нуль и регулирование тока роизводятся с помощью реохорда $R_5$ и реостата $R_6$.

Газоанализатор МГК-6 аналогичен МГК-4 по принципу действия и конструктивной схеме. Отличие заключается в следующем. азоанализатор МГК-4 для устранения погрешностей от колебания тмосферного давления, особенно заметных при измерении высоких онцентраций кислорода, комплектуется регулятором (стабилизатором) давления. В газоанализаторе МГК-6 для устранения указанной погрешности предусмотрена возможность изменения напряженности магнитного поля, обеспечивающая отсутствие потока в измерительной трубке при концентрации кислорода, соответствующей ередине шкалы, что уменьшает влияние барометрического давления. Погрешность, вызываемая влиянием барометрического давления в газоанализаторах типа МГК-6, составляет ±1,5% на каждые 0 *мм рт. ст.*

В табл. 13.2 приведена краткая техническая характеристика автоматических газоанализаторов кислорода. Газоанализаторы, рассчитанные на малые содержания кислорода (ТХГ-6, ГЛ-5108, ДПГ-5А-52), применяют для контроля получаемого азота.

Кроме описанных термомагнитных газоанализаторов, применяют акже автоматические газоанализаторы кислорода, основанные на ругих физико-химических принципах, например: термохимические ТХГ), электрохимические гальванические (ГЛ), электрохимические деполяризационные (ДПГ).

При помощи автоматических газоанализаторов концентрация олучаемого кислорода непрерывно контролируется и регистрируется, что облегчает автоматизацию управления и контроля процесса воздухоразделительном аппарате.

**Определение концентрации азота.** Концентрацию азота определяют как разность между 100 процентами и содержанием кислорода в азоте (в %).

Содержание кислорода менее 1% определяют по изменению краски аммиачного раствора хлористой меди (при поглощении кислорода), сравнивая ее с окраской контрольного раствора серноислой меди, приготовленного для разных концентраций кислорода. етодика и приборы для этого определения описаны в ГОСТ 993—59*.

Содержание кислорода более 1% определяют поглощением его аствором пирогаллола или гидросульфита натрия. Разрешается акже пользоваться для анализа желтым фосфором в приборе Гемеля измененной конструкции, или автоматическим газоанализатором.

Раствор пирогаллола готовят следующим образом: 10 *г* пирогаллола, взвешенного с точностью до 0,01 *г*, растворяют в 30 *см*³ оды и разбавляют до 200 *см*³ 60%-ным раствором едкого кали. елочной раствор гидросульфита натрия приготовляют так:

Таблица 13.2. **Техническая характеристика автоматических газоанализаторов кислорода**

| Показатели | Тип анализатора | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | термомагнитные | | | | | | | | | термохимический | гальванический | деполяризационный |
| | МН-5121 МН-5122 МН-5125* | МН-5127* | МН-5128* | МН-5130* | МН-5131* | МН-5132* | МГК-3** | МГК-6** | МГК-2М** | ТХГ-6*** | ГЛ-5108*** | ДПГ-5А-52**** |
| Пределы измерения концентрации кислорода, % | 15—30 | 0—5<br>0—20 | 90—100<br>98—100 | 0—0,5<br>0—1,0<br>0—2,0<br>0—5,0<br>0—10,0<br>0—21<br>0—50<br>50—100<br>20—80<br>80—100 | 0—7<br>7—21 | 90—98<br>98—100 | 0—5<br>0—10<br>0—15<br>0—21<br>15—45<br>0—50 | 20—50<br>20—80<br>50—100<br>80—100<br>90—100<br>95—100 | 0—5<br>0—10<br>0—21<br>15—21 | 0—0,01<br>0—0,1<br>0—0,2 | 0—0,05<br>0—0,01<br>0—0,005<br>0—0,001<br>0—0,0005 | 0—0,1<br>0—0,2<br>0—1,0<br>0—2,0<br>0—5,0<br>0—10 |
| Основная погрешность, % от диапазона шкалы | ±3,0 | ±4,0<br>±2,0 | ±2,0<br>±5,0 | ±10<br>±5,0<br>±2,0 | ±2,0 | ±2,5<br>±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±2,5 | ±10 | ±10 | ±10 |
| Время запаздывания, *сек* | 18 | 60 | 60 | 90 | 60 | 60 | 95 | 90 | 90 | 200 | 300 | 60 |
| Подача газовой смеси, *л/ч* | 42 | 42 | 42 | 48 | 42 | 42 | 250 | 250 | 200 | 60 | 10 | — |
| Избыточное давление газовой смеси | 0,9—1,1 *кгс/см²* (абсолютное) | 0,1—6 *кгс/см²* | до 0,6 *кгс/см²* | От 20 до 400 *мм рт. ст.* | 0,1—6 *кгс/см²* | До 0,6 *кгс/см²* | Не менее 65 *мм вод. ст.* | Не менее 50 *мм вод. ст.* | Не менее 50 *мм вод. ст.* | 250—2000 *мм вод. ст.* | — | — |

142,9 *г* едкого кали растворяют в 1 *л* воды; перед наполнением пипетки берут 200 *см*³ этого раствора и нагревают в колбе до 30—35 °С, затем добавляют 57,2 *г* гидросульфита натрия и заливают раствор слоем вазелинового или парафинового масла для защиты от воздействия воздуха.

Желтый фосфор при соприкосновении с атмосферным воздухом воспламеняется, поэтому при выполнении анализов следует соблюдать особую осторожность: держать фосфор все время под водой и следить за тем, чтобы прибор не разбился, так как это может вызвать воспламенение находящегося в нем фосфора.

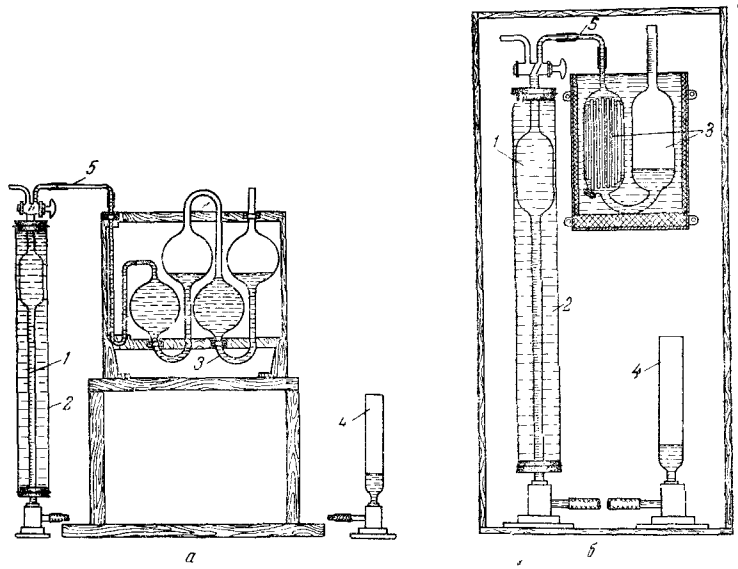



Рис. 13.16. Приборы для определения содержания кислорода в техническом азоте:

*а* — при помощи раствора пирогаллола или гидросульфита натрия; *б* — при помощи желтого фосфора; *1* — бюретка; *2* — водяная рубашка; *3* — пипетки; *4* — уравнительный сосуд; *5* — капиллярная трубка.

Приборы для определения содержания кислорода в азоте показаны на рис. 13.16. Емкость измерительной бюретки 100 *мл*. Более узкая нижняя часть бюретки имеет объем 10 *см*³ и деления через 0,1 *см*³.

Для более точного определения содержания кислорода в азоте или сыром аргоне используют поглотительный прибор, бюретка которого состоит из двух параллельно включенных частей: четырехшариковой рабочей бюретки объемом 80 *мл* и цилиндрической микробюретки объемом 22 *мл*. Микробюретка градуирована делениями с ценой по 0,05 *мл*. Такой прибор позволяет определять содержание кислорода с точностью до 0,05%.

Контрольную проверку концентрации газообразного азота проводят в 5% баллонов из каждой партии, но не менее чем в двух баллонах при малых партиях. Партией считается число баллонов, наполненных за одну смену или одновременно из одного коллектора рампы.

Пробы жидкого азота отбирают во время слива его из разделительного аппарата в сосуды Дьюара или транспортные емкости через каждый час. При несоответствии результатов какого-либо испытания требованиям ГОСТ проводят повторное испытание, результаты которого считаются окончательными.

В воздухоразделительных установках для определения содержания кислорода в азоте используются также газоанализаторы непрерывного действия МН-5127, МН-5131, ТХГ-6, ГЛ-5108, ДПГ-5А-1 (см. табл. 13.2).

Для определения малых концентраций азота в чистом аргоне используют приборы количественного спектрального анализа газов.

**Определение вредных примесей в медицинском кислороде.** Анализ проводят в склянках для промывания газа, заполненных поглотительным раствором.

Определение окиси углерода. Через промывную склянку, в которой находится 100 *мл* слабо нагретого аммиачного раствора нитрата серебра*, пропускают 2000 *мл* кислорода. Если раствор остается бесцветным и прозрачным, значит, окись углерода отсутствует.

Определение газообразных кислот и оснований. В три склянки для промывания газов наливают по 100 *мл* свежепрокипяченной воды и добавляют в каждую из них по 3 капли раствора метилового красного (ГОСТ 5853—51). Затем в вторую склянку доливают 0,2 *мл*, в третью 0,4 *мл* соляной кислоты. Через раствор во второй склянке пропускают равномерно 2000 *мл* кислорода в течение 30—35 *мин* и сравнивают полученную окраску раствора с окраской растворов в первой и третьей склянках. Раствор во второй склянке должен сохранять розовый цвет в отличие от раствора в первой склянке, окрашенного в желтый цвет, что указывает на допустимое содержание газообразных оснований в испытуемом медицинском кислороде. После пропускания кислорода интенсивность розовой окраски раствора во второй склянке должна быть слабее, чем в третьей; это указывает на то, что содержание газообразных кислот в испытуемом медицинском кислороде находится в допустимых пределах.

Определение озона и других газов-окислителей. Через свежеприготовленный раствор, состоящий из 0,5 *г* крахмала и 0,5 *г* иодида калия, растворенных в 100 *мл* дистиллированной воды, пропускают 2000 *мл* кислорода. В отсутствие вредных примесей окраска жидкости не меняется.

Определение двуокиси углерода. Через 100 *мл* прозрачного раствора гидрата окиси бария [5 *г* $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ в 100 *мл* дистиллированной воды] пропускают 1000 *мл* кислорода в течение 15—20 *мин*. Помутнение раствора после пропускания кислорода не должно быть больше, чем у контрольного раствора, что указывает на отсутствие двуокиси углерода.

* Аммиачный раствор нитрата серебра готовят следующим образом: $AgNO_3$ взвешивают с точностью до 0,001 *г* и растворяют в 100 *мл* дистиллированной воды, к раствору приливают по каплям при постоянном помешивании 10%-ный раствор аммиака, пока осадок не будет почти (но не полностью) растворен; раствор фильтруют и хранят в хорошо закупоренных склянках из темного стекла, в затемненном месте.



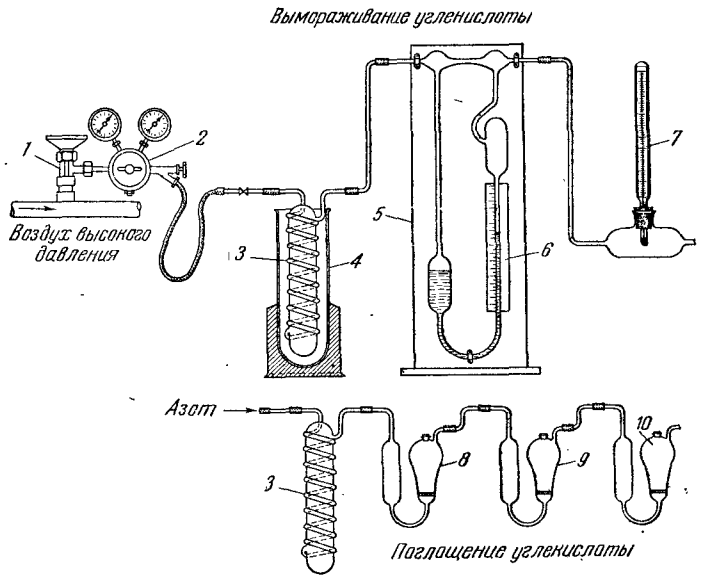



Рис. 13.17. Определение содержания двуокиси углерода в воздухе:
1 — вентиль; 2 — редуктор; 3 — змеевики; 4 — сосуд; 5 — реометр; 6 — шкала реометра; 7 — термометр; 8, 9 и 10 — поглотители.

**Определение содержания двуокиси углерода в воздухе.** Схема определения приведена на рис. 13.17. Проба воздуха отбирается через вентиль *1* и редуктор *2*. Воздух пропускается через стеклянный змеевик *3*, погруженный в сосуд *4* с жидким кислородом, при этом содержащаяся в воздухе двуокись углерода вымерзает в змеевике. Количество пропускаемого воздуха измеряется реометром *5* со шкалой *6* (в *дм*³/*мин*). Температура воздуха измеряется термометром *7*. Спустя некоторое время прекращают подачу воздуха в змеевик, сосуд убирают, а змеевик продувают сухим азотом. К другому концу змеевика присоединяют последовательно поглотители *8*, *9* и *10*, каждый из которых заполнен 25 *см*³ баритовой воды. Вымерзшая в змеевике двуокись углерода отогревается азотом, испаряется и поглощается баритовой водой. Поток азота регулируют так, чтобы через поглотители в течение 10—15 *мин* прохо-

дил 1 $дм^3$ газа. Помутнение баритовой воды указывает на недос точную очистку воздуха от двуокиси углерода.

Для определения двуокиси углерода при содержании ее от до 0,1% и от 0 до 5% $CO_2$ применяется автоматический газоана затор ГИП-7 (завод «Лаборприбор», г. Клин).

**Количественное определение двуокиси углерода в жидком кислороде или жидком воздухе.** Стеклянную колбу емкостью 2 промывают, просушивают, продувают азотом, отбирают в нее пр бу жидкого кислорода (или жидкого воздуха) около 2 $дм^3$ и гер тически закрывают резиновой пробкой. Из взятой пробы 250 сжиженного газа наливают во вторую колбу емкостью 300 *мл*, пр варительно продутую азотом. Эту колбу помещают в ящик с нералыной ватой.

Испаряющийся из колбы кислород пропускают по трубке че стеклянный змеевик, опущенный в сосуд Дьюара, наполнен жидким кислородом. В змеевике происходит вымерзание двуок углерода, содержащейся в пробе жидкого кислорода. К змеев присоединяют последовательно две поглотительные склянки, в к дую из которых налито по 50 или 100 *мл* баритовой воды [на щенного раствора $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$].

Внутренние трубки поглотителей должны быть опущены в р твор на глубину не менее 4—5 *см*. Через склянки пропускают из змеевика, который вынимают из сосуда Дьюара. Всю сист продувают азотом в течение 20 *мин* со скоростью 1—2 пузыр секунду. Затем в каждый поглотитель вводят по две капли фен фталеина и оттитровывают избыток баритовой воды 0,02 н. рас ром соляной кислоты до исчезновения розового окрашивания. В лостой пробе определяют расход соляной кислоты на титрова 50 *мл* баритовой воды. Содержание двуокиси углерода $A$ (в подсчитывают по формуле:

$$A = (v_1 - v_2)\,0{,}235 \cdot 4$$

где $v_1$ — расход HCl на титрование холостой пробы, *мл*;
$v_2$ — расход HCl на обратное титрование баритовой воды в двух погл телях, *мл*;
0,235 — количество $CO_2$, соответствующее 1 *мл* 0,02 н. соляной кислоты.

Описанный метод определения содержания $CO_2$ называе *титрометрическим*. Он может применяться при содержании $CO_2$ исследуемом газе от 0,001 до 0,1%. Чувствительность метода ра 10 $см^3/м^3$. Продолжительность анализа 30—40 *мин*. Этот метод пользуется также для определения содержания $CO_2$ в пробе с того воздуха.

Для количественного определения содержания $CO_2$ в возд и в других газах можно применять также следующие методы.

Электрокондуктометрический метод основан поглощении $CO_2$ раствором гидроокиси бария. Содержание $CO_2$ ределяют по изменению электропроводности раствора гидроо бария. Метод пригоден для диапазона концентраций $CO_2$ от 0,0



до 0,5%; чувствительность — 5 $см^3/м^3$, продолжительность анализа — 5 *мин*.

Кристаллографический метод заключается в том, что пленка раствора гидроокиси бария омывается анализируемым газом, содержащим $CO_2$. Концентрацию $CO_2$ в газе находят по времени появления видимых кристаллов карбоната бария в пленке, которые образуются в результате реакции $CO_2$ с $Ba(OH)_2$. Для анализа применяют прибор КГ-1 конструкции ВНИИкриогенмаш. Предварительно прибор калибруют с помощью приготовленных газовых смесей с заранее известной концентрацией двуокиси углерода. Метод может применяться при содержании в исследуемом газе от $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ до 0,03% $CO_2$; чувствительность метода — 1,5 $см^3/м^3$, продолжительность анализа 5—15 *мин*.

Хроматермографический метод — поглощением $CO_2$ цеолитом в хроматографической колонке (см. разд. 13.9); он применим при концентрациях $CO_2$ в газе от $5 \cdot 10^{-5}$ до 0,001%, чувствительность метода — 0,5 $см^3/м^3$, продолжительность анализа зависит от объема пробы газа.

**Определение состава газа с помощью газовых весов.** Способ основан на взвешивании двух столбов газовой одинаковой высоты и диаметра с помощью так называемых газовых весов. Этот способ применяют при контроле процесса получения сырого аргона для определения содержания в нем чистого аргона.

Газовые столбы получают, заполнив вертикальные трубки-стояки газом. Нижние концы стояков соединяют чувствительным дифманометром. Разность давления двух столбов, измеряемая дифманометром, пропорциональна разности весов газовых столбов; чем тяжелее один из газов, тем большее отклонение покажет дифманометр. Если известна плотность одного из газов, то по показаниям газовых весов легко определить плотность и состав второго газа, пользуясь для этого формулами или заранее составленными таблицами.

Стояки *2* и *3* газовых весов (рис. 13.18) представляют собой медные трубки диаметром 10 *мм*, высотой 8 *м*. Вверху концы стояков защищены колпаком *1*, сообщающимся с атмосферой, а нижние концы присоединены к трехходовым кранам *4* и *5*. Кран *8* служит для установки дифманометра на нуль; краны и стеклянные тройники для переключения газов укреплены на щитке *6*.

Открытый водяной затвор *7* применяется для регулирования скорости движения газов при заполнении ими стояков, а также для выпуска в атмосферу исследуемых газов при производстве анализа. Дифманометр наполняют керосином, который более подвижен, чем вода. Шкалу *9* дифманометра для удобства отсчета можно перемещать винтом *11*.

Для получения точных результатов необходимо обеспечить герметичность прибора, свободный проход в стояках и трубках, отсутствие влаги в стояках, исключить дрожание пола в помещении, где установлены весы.

Анализ проводят следующим образом. Поворачивая трехходо вые краны, впускают в левый стояк воздух, а в правый — кислоро концентрации 98%. Примерно через 2—3 *мин*, когда стояки запол нятся газами, кран *8* закрыва ют, а краны *4* и *5* ставят в по ложение, при котором стояки соединяются с дифманометром При помощи винтов *12* уста навливают прибор таким обра зом, чтобы жидкость в наклон ной трубке дифманометра ос тановилась на делении 50 Затем через правый стояк про пускают анализируемый газ — сырой аргон, в то время как через левый стояк продолжает протекать воздух. Допустим, что при этом жидкость в тру ке дифманометра остановила на каком-то делении *A*. Тогда содержание азота в исследу мом сыром аргоне определяют по формуле:

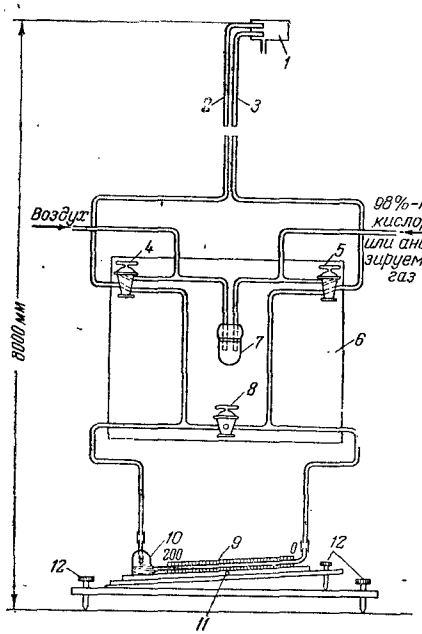



Рис. 13.18. Схема газовых весов:
*1* — колпак; *2*, *3* — стояки; *4*, *5* — трехходовые краны; *6* — щиток; *7* — водяной затвор; *8* — уравнительный кран; *9* — шкала дифференциального манометра; *10* — дифференциальный манометр; *11* — винт для перемещения шкалы; *12* — установочные винты.

$$x = 7{,}91 + 0{,}526A - 0{,}335y$$

где $x$ — содержание азота в сыром аргоне, %;
$y$ — содержание* кислорода в пробе сырого аргона, %;
$A$ — отсчет по шкале дифманометра.

Содержание аргона находят из разности

$$\text{Ar} = 100 - (x + y)\ \%$$

При анализах пользуются заранее составленной таблицей или графиком, с помощью которых сразу находят чистоту аргона по значениям $x$ и $y$.

**Пример.** Отсчет на дифманометре (полученный при анализе) $A = 16$. Если сырой аргон содержит 5% кислорода, то $y = 5$, тогда

$$x = 7{,}91 + 0{,}526 \cdot 16 - 0{,}335 \cdot 5 = 14{,}6\%$$

Содержание аргона составит:

$$\text{Ar} = 100 - (14{,}6 + 5) = 80{,}4\%$$

* Эту величину определяют прибором для анализа кислорода.



Анализ при помощи газовых весов очень трудоемок и неудобен при большом количестве проводимых анализов. Взамен его предлагается хроматографический метод анализа тройной смеси азот — аргон — кислород*. Схема разделения анализируемой смеси двухколончатая; используется серийный хроматограф ХЛ-4. Одна из хроматографических колонок служит для выделения (при 40 °С) аргона, в другой происходит разделение аргона и кислорода при —90,6 °С. В качестве адсорбента применяют молекулярные сита 10Х, в качестве газа-носителя гелий. Хроматограф четко регистрирует пики всех трех компонентов: азота, аргона и кислорода. Кроме того, пик, пропорциональный суммарному содержанию аргона и кислорода. Абсолютная ошибка опыта не более 0,5%. Минимальная концентрация, регистрируемая прибором, составляет 0,1%. Продолжительность анализа 8 *мин*.

## 13.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ КИСЛОРОДА И ВОЗДУХА

Влажность газов определяют по точке росы, используя для этого гигрометры. В гигрометре Г-2 (рис. 13.19) проверяемый газ через вентиль *1*, трубку *2* и фильтр *3* поступает в корпус *5* измери-

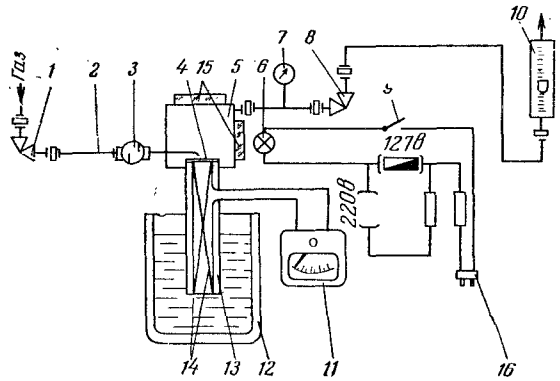



Рис. 13.19. Схема прибора Г-2 для определения влажности газа по точке росы:
*1* — вентили; *2* — трубка; *3* — фильтр; *4* — зеркало; *5* — корпус измерительной головки; *6* — лампочка; *7* — манометр; *9* — тумблер; *10* — ротаметр; *11* — милливольтметр; *12* — сосуд с жидким кислородом или азотом; *13* — холодопровод; *14* — двойная термопара; *15* — стекла измерительной головки; *16* — штепсельная вилка.

ной головки. Струя газа направляется на хромированную и серебрированную поверхность зеркала *4*, которым служит срез конца медного холодопровода *13*, опущенного в сосуд *12* с жидким кисло-

* В. К. Орлов, В. С. Кортиков, Л. Н. Чекалов, Л. Б. Левев, А. С. Бронштейн и С. Н. Титенкова, Хроматографический метод анализа тройной смеси азот — аргон — кислород. Криогенное, газодное и автогенное машиностроение, ЦИНТИхимнефтемаш, № 3, 1970. Принцип хроматографического метода анализа см. разд. 13.9.

родом или азотом. Внутрь холодопровода введена двойная мель-копелевая термопара *14*, верхние концы которой (горя припаяны снизу к оборотной стороне поверхности зеркала *4*, а ние (холодные) опущены в жидкий кислород; термопара прис нена к милливольтметру *11*. Давление газа в головке измеря манометром *7*; газ из нее через вентиль *8* и ротаметр *10* отвод наружу.

В головке имеются два стекла *15*; через одно лампочкой *6* свечивается зеркало *4*, а через второе (верхнее) ведется набл ние за поверхностью зеркала. Прибор включается в сеть 127 *в* 220 *в* с помощью штепсельной вилки *16* и тумблера *9*. По охлаждения зеркала от холодопровода *13* до температуры т росы при данном влагосодержании газа влага конденсируетс поверхности зеркала и оно мутнеет.

Таблица 13.3. **Содержание водяных паров в газе**

| Содержание водяных паров при нормальных условиях, *г/м³* | Давление в приборе, *кгс/см²* | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 50 | 100 | 150 | 20 |
| | Температура насыщения, °С | | | | |
| 0,076 | —42 | —5,0 | +1,5 | +5,5 | +8, |
| 0,060 | —44 | —7,5 | —1,5 | +2,5 | +4, |
| 0,047 | —46 | —11,0 | —4,5 | —1,0 | +1, |
| 0,037 | —48 | —14,0 | —7,5 | —5,0 | —3, |
| 0,029 | —50 | —16,0 | —10,5 | —7,5 | —5, |
| 0,023 | —52 | —19,0 | —13,5 | —9,5 | —8, |
| 0,018 | —54 | —22,0 | —16,0 | —13,5 | —11 |
| 0,014 | —56 | —25,0 | —20,0 | —17,0 | —1 |
| 0,010 | —58 | —28,0 | —23,0 | —20,0 | —1 |
| 0,008 | —60 | —31,0 | —26,0 | —23,5 | —2 |
| 0,0061 | —62 | —33,5 | —29,5 | —27,0 | —2 |
| 0,0046 | —64 | —36,5 | —31,5 | —30,0 | —2 |
| 0,0034 | —66 | —39,5 | —35,5 | —33,5 | — |
| 0,0026 | —68 | —42,0 | —38,0 | —36,0 | — |
| 0,0019 | —70 | —45,0 | —41,5 | —39,5 | — |

Определение влажности газа производится следующим обр Открывают постепенно вентиль *1* и продувают гигрометр га скоростью 3—5 *дм³/мин*. Скорость пропускаемого газа регули ся вентилем *8* и контролируется ротаметром *10*. После неско минут продувки скорость газа уменьшают до 1—1,5 *дм³/мин* чинают охлаждать холодопровод *13*, поднимая вверх сосуд жидким кислородом. Охлаждение ведут таким образом, чтобы пература, пропорциональная разности потенциалов, контрол мой милливольтметром *11*, понижалась при охлаждении до — со скоростью 18—20 *град/мин*, а к концу охлаждения — не 8—10 *град/мин*. Когда влага, содержащаяся в газе, начнет ко сироваться на зеркале *4*, оно станет тускнеть, что видно через нее стекло *15*. В этот момент по милливольтметру определяют пературу зеркала.



Содержание водяных паров ($x_1$) в *г/м³* определяют по темпера ре насыщения (точка росы) и давлению кислорода в приборе, льзуясь табл. 13.3. При охлаждении жидким азотом температуру ркала принимают на 13 *град* ниже, указанной в табл. 13.3.

На рис. 13.20 показан прибор в подготовленном для работы виде передняя стенка прибора открыта), а на рис. 13.21 — измерительная головка прибора.

Описанный прибор пригоден для определения влажности кислорода, азота и воздуха при избыточном давлении до 220 *кгс/см²* и агосодержании, соответствующем точке росы от 0 до —70 °С.

Кулонометрический метод определения содержания водяных паров основан на непрерывном количественном извлечении водяных паров из испытуемого газа гигроскопичным веществом и одновременном электролитическом разложении извлекаемой воды на водород и кислород. Необходимый при этом ток электролиза является мерой концентрации водяных паров в газе. Для того определения применяют прибор КИВГ (кулонометрический измеритель влажности газа). В этом приборе влага непрерывно извлекается из газа пленкой гидрофильного вещества (фосфорного ангидрида) и одновременно производится ее электролитическое разложение на водород и кислород в толще пленки. В установившемся режиме величина тока электролиза служит мерой абсолютного количества влаги, поступающей в прибор в единицу времени. Шкала прибора откалибрована в *мл/м³*. Содержание водяных паров ($x_1$) в *г/м³* вычисляют по формуле

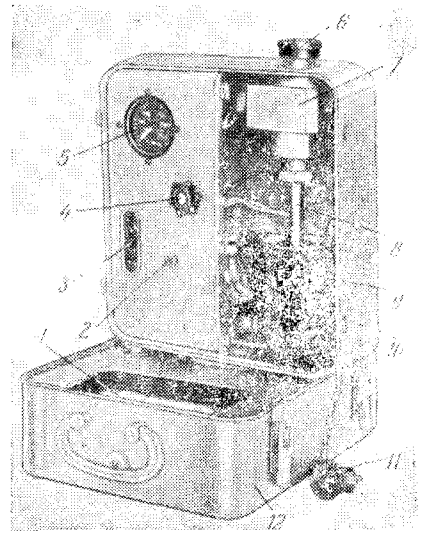



Рис. 13.20. Общий вид прибора Г-2:
*1* — милливольтметр; *2* — тумблер; *3* — ротаметр; *4* — вентиль; *5* — манометр; *6* — окуляр; *7* — корпус измерительной головки; *8* — холодопровод; *9* — стопорный винт для крепления сосуда с охлаждающей жидкостью; *10* — сосуд; *11* — штепсельная вилка; *12* — футляр.

$$x_1 = 0{,}749 \cdot 10^{-3}\, n$$

где $n$ — показания прибора, *мл/м³*.

На рис. 13.22 дана схема прибора КИВГ для измерения влажности газа среднего давления. Анализируемый газ подается в редуктор *1*, поддерживающий избыточное давление после себя в пределах 1—2 *кгс/см²*. Часть газа (примерно 0,9 *дм³/мин*) после редук-

тора отводится в дренаж через дюзу *2*; остальная часть (0,1 *дм³/мин*) проходит фильтр *3*, дюзу *4*, рабочий и контрольный чувствительные элементы *5* и *6*, ротаметр *7* и сбрасывается в дренаж.

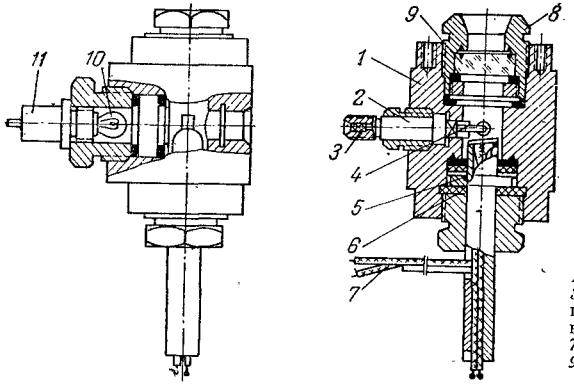



Рис. 13.21. Измерительная головка прибора Г-2.

*1* — корпус; *2* — штуцер; *3* — фильтр; *4* — срез трубки подвода газа; *5* — холодоотвод; *6* — текстолитовая шайба; *7* — термопара; *8* — окуляр; *9* — стекло; *10* — лампочка; *11* — патрон.

Устройство чувствительного элемента показано на рис. 13.23. Во внутреннем канале цилиндрического пластмассового корпуса *1* помещены два металлических электрода *2*, выполненные в виде

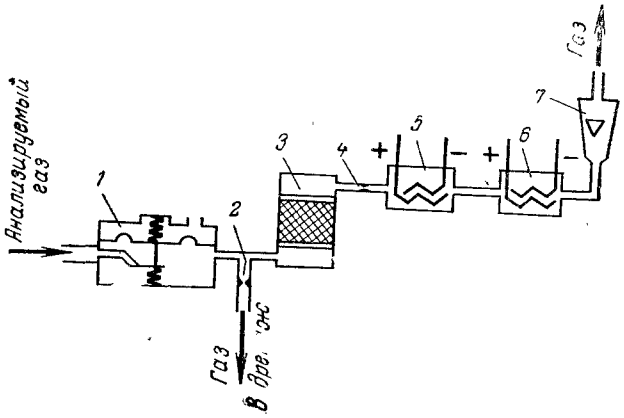



Рис. 13.22. Газовая схема кулонометрического измерителя влажности газов КИВГ:

*1* — редуктор; *2*, *4* — дюзы; *3* — фильтр; *5*, *6* — чувствительные элементы; *7* — ротаметр.

геликоидальных несоприкасающихся спиралей. Между электродами нанесена пленка частично гидратированной пятиокиси фосфора *3*, обладающая высокой осушающей способностью. Через элемент в направлении, указанном стрелками, непрерывно подается анализируемый газ при постоянном расходе. Размеры элемента и расход газа подобраны так, что влага практически полностью извлекается из газа. Соединяясь с веществом пленки, влага образует раствор фосфорной кислоты с высокой удельной проводимостью. К электродам подключен источник постоянного тока, напряжение которого превышает потенциал разложения воды настолько, что одновременно с поглощением воды происходит ее электролиз. При установившемся режиме количества воды, поглощенной и разложенной в единицу времени, равны. Следовательно, ток электролиза, измеряемый микроамперметром, включенным последовательно с источником питания, является точной мерой содержания влаги в анализируемом газе. Погрешность анализа не превышает ±3—5% для шкалы в диапазонах 0—0,001 и 0—0,002%, что соответствует содержанию влаги соответственно 0—7,48 и 0—19,96 *мг/м³* газа при нормальном давлении. Температура анализируемого газа* на входе в прибор может быть от −10 до +50 °С.

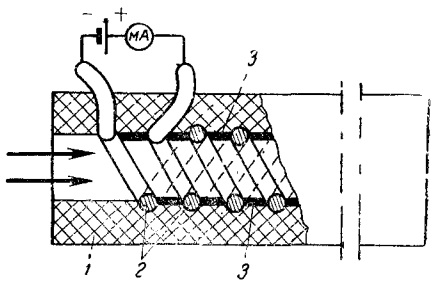



Рис. 13.23. Трубчатый чувствительный элемент кулонометрического измерителя влажности газов КИВГ:

*1* — пластмассовый корпус; *2* — металлические электроды; *3* — пленка пятиокиси фосфора.

## 13.7. КОНТРОЛЬ СОСТАВА РЕДКИХ ГАЗОВ

**Контроль аргона.** Пробу газа для проверки на содержание азота и влаги отбирают из каждого баллона, кислорода — от каждого пятого баллона из партии.

Содержание кислорода, азота, влаги и аргона определяют следующими методами.

Кислород — поглощением газа раствором полухлористой меди в приборе, описанном в ГОСТ 10157—62 «Аргон газообразный чистый», и последующим сравнением окраски полученного раствора с окраской растворов эталонной шкалы.

Содержание кислорода (в интервале концентраций от 0,001 до 0,01%) в чистом аргоне определяют также при помощи индикаторной лампы. Инертный газ пропускают через нагретую индикаторную лампу; при этом вольфрамовые спирали лампы покрываются окисной пленкой, цвет которой в зависимости от содержания кислорода может быть от желтовато-бурого до черно-синего. Время появления окисной пленки, характер и интенсивность ее окраски

* П. М. Стефаненко, Л. Я. Глушко, В. И. Савенко, Кислородная промышленность, № 3 (1970).

указывает на содержание кислорода в анализируемом инерт газе.

Азот — спектральным методом с фотоэлектрической регис цией. Сущность метода заключается в измерении отношения ин сивностей линий азота и аргона, выделяемых из спектра газ смеси.

Влагу — по методу точки росы с помощью прибора КИВГ приборов других типов.

Аргон — по разности.

**Контроль криптона и криптоно-ксеноновой смеси.** Пробу кр тона и криптоно-ксеноновой смеси отбирают из каждого балл Содержание криптона и ксенона определяют масс-спектрометр ским методом, имеющим чувствительность 0,001%. Способ опр ления описан в ГОСТ 10218—67. Допускается определять содер ние криптона и ксенона (в сумме или отдельно) волюмоманом рическим методом по методике ВНИИкриогенмаш. Чувствит ность метода 0,2%. Метод основан на измерении остаточного о ема Kr и Xe после удаления активных примесей ($N_2$, $O_2$ и др.) глощением их кальциевой стружкой при 550—600 °С и удале аргона откачкой газовой фазы вакуум-насосом при одновремен вымораживании Kr и Xe жидким азотом. Для этого использу прибор СВ-7622, подробно описанный в ГОСТ 10218—67.

Содержание кислорода в техническом криптоне и криптоно- ноновой смеси определяют колориметрическим методом.

Азот в сумме с аргоном вычисляют по данным масс-спектро рического определения азота в аргоне или по разности ме 100% и содержанием криптона в сумме с ксеноном, кислород $CO_2$.

Количество углеводородов и двуокиси углерода в техниче криптоне и криптоно-ксеноновой смеси определяют титрометр ским методом на газоанализаторе ВНИГНИ—ВНИИкриогенм

Содержание влаги находят по точке росы с помощью при КИВГ.

Описания методики анализов и приборов даны в Г 10218—67 «Криптон и криптоно-ксеноновая смесь».

**Контроль технологического процесса извлечения, обогащен очистки инертных газов** осуществляется с применением ручны автоматических газоанализаторов, указанных в табл. 13.4.

Термокондуктометрические газоанализаторы (ТКГ) осно на использовании различной теплопроводности газов, входящ анализируемую смесь. Эти приборы особенно удобны для ана смесей аргон — азот и аргон — азот — кислород, так как коэф ниенты теплопроводности азота и кислорода близки между со но примерно в $1^1/_2$ раза больше теплопроводности аргона. Дл мерения применяют метод уравновешенного моста, через ка которого пропускают анализируемый газ и воздух. Вследствие ности теплопроводности воздуха и анализируемой смеси тем туры предварительно нагретых плеч моста, а следовательно,



| Контролируемый газ | Определяемый компонент | Приборы: ручные | Приборы: автоматические |
|---|---|---|---|
| Колонна сырого аргона | | | |
| Аргонная фракция | Аргон или азот | Газовые весы ВГ-8 | Газоанализатор на аргон ТКГ-4П; 0—15% Ar |
| | Кислород | Газоанализатор ГК-1 | Газоанализаторы МН-5130 или МГК-6 на 50—100% $O_2$ |
| Сырой аргон | Аргон или азот | Газовые весы ВГ-8 | Газоанализатор ТКГ-4Р; 70—100% Ar |
| | Кислород | Газоанализатор СВ-7636 или ГХП-3М. Завод «Лаборприбор» | Газоанализатор МГК-3 или ДПГ-5А-52 на 0—10% $O_2$ |
| Установка очистки аргона УТА | | | |
| Циркуляционный газ | Кислород | То же | |
| | Водород | Газоанализатор ВТИ. Завод «Лаборприбор» | Газоанализатор ТКГ-5Б; 0—5% $H_2$ |
| Технический аргон после контактных аппаратов | Кислород | Газоанализатор СВ-7632. Завод «Лаборприбор» | Газоанализатор ТХГ-6 или ГЛ-5108; 0—0,001% $O_2$ |

*Продолжение*

| Контролируемый газ | Определяемый компонент | Приборы | |
|---|---|---|---|
| | | ручные | автоматические |
| | | Колонна для очистки от азота | |
| Чистый аргон | Азот | Прибор для спектрального анализа с фотоэлектрической регистрацией | Газоанализатор СФ-4102 со шкалой 0—0,1% азота. Завод средств автоматики, г. Смоленск |
| | Пары воды | Прибор ИИГ-1. Институт использования газа АН СССР | Прибор Г-2 или ДДН-2. Завод «Киевприбор» |
| | Кислород | Газоанализатор СВ-7632. Завод «Лаборприбор» | Газоанализатор ТХГ-6 или ГЛ-5108 |
| | | Колонна первичного криптонового концентрата | |
| Первичный криптоновый концентрат | Криптон | Газоанализатор СВ-7622. Завод «Лаборприбор» | Газоанализатор ХТД. Институт ВНИИКАнефтегаз |
| | Углеводороды | Газоанализатор СВ-7633. Завод «Лаборприбор» | Газоанализатор ГИП-7 (с предварительным выжиганием углеводородов) |
| [illegible] | [illegible] | [illegible] | |
| | | **Установка очистки криптона УСК-1** | |
| Концентрат после печей 1-го выжигания | Углеводороды | Газоанализатор СВ-7633. Завод «Лаборприбор» | — |
| Концентрат после печей 2-го выжигания | Углеводороды | Газоанализатор СВ-7633. Завод «Лаборприбор» | — |
| Сырой криптон из колонны вторичного концентрирования | Кислород | Газоанализатор ГК-1 | — |
| Жидкий воздух из конденсатора колонны вторичного концентрирования | Ацетилен | Прибор СВ-7623. Завод «Лаборприбор» | — |
| Криптон и криптоно-ксеноновая смесь | Криптон | Прибор СВ-7622. Завод «Лаборприбор» | — |
| | Ксенон | То же | — |
| | Углеводороды | Прибор СВ-7633. Завод «Лаборприбор» | — |
| | Двуокись углерода | То же | — |
| | Пары воды | Прибор ИИГ-1 | — |
| | Кислород 0,1% $O_2$ | Прибор СВ-7636. Завод «Лаборприбор» | — |

сопротивления после охлаждения, будут различны, что вызывает отклонения стрелки гальванометра тем большее, чем больше аргона содержится в смеси (приборы ТКГ-4П и ТКГ-4Р).

Для определения водорода в техническом аргоне последний разделяется на два потока; из одного потока водород удаляют нагретой окисью меди, после чего сравнивают теплопроводность газов обоих потоков, пользуясь прибором ТКГ-5Б.

Для определения содержания азота в чистом аргоне применяют спектрофотометрический метод (прибор СФ). Он основан на измерении интенсивности светового потока газа в высокочастотном (20 *мгц*) разряде. С помощью светофильтров из светового потока выделяют линии, характерные для излучений азота и аргона, воспринимаемые фотоэлементами. Так как содержание аргона в смеси можно принять постоянным, то отношение величин токов, возбуждаемых фотоэлементами, зависит только от содержания азота и будет тем больше, чем выше его содержание в смеси. Для настройки, градуирования и последующей проверки анализатора пользуются набором эталонов аргона с известной концентрацией азота в пределах от 0,01 до 0,10%.

Прибор СВ-7632 (типа Мукдана) применяют для определения содержания кислорода в инертных газах. В данном приборе кислород окисляет бесцветный аммиачный раствор полухлористой меди; при этом цвет раствора становится синим.

## 13.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТВОРА ЕДКОГО НАТРА

Степень использования раствора едкого натра определяют **титрованием**. Исследуемый раствор наливают в склянку, предварительно ополоснутую этим же раствором. Из склянки отбирают пипеткой 5 *мл* раствора в мерную колбу, разбавляют дистиллированной водой до 250 *мл* и приливают к нему 2 капли фенолфталеина. Пипеткой отбирают 25 *мл* этого раствора в колбу емкостью 250 *мл* и по каплям приливают туда из бюретки водный раствор соляной кислоты. Кислоту добавляют до тех пор, пока не исчезнет розовая окраска раствора. Количество израсходованной соляной кислоты записывают. Затем в раствор приливают 3 капли раствора метилового оранжевого и продолжают добавлять в него соляную кислоту до перехода желтой окраски раствора опять в розовую. Вновь потребовавшееся количество соляной кислоты записывают.

Если количество соляной кислоты (в *мл*), добавленное в присутствии метилового оранжевого, обозначить через *Б*, то степень использования раствора щелочи в декарбонизаторе равно

$$\frac{2Б}{А+Б}\cdot 100\%$$



**Пример.** $А=13{,}2$ *мл*; $Б=6{,}5$ *мл*. Степень использования раствора щелочи составит:

$$\frac{2\cdot 6{,}5\cdot 100}{13{,}2+6{,}5}=66\%$$

Если при втором добавлении соляной кислоты (в присутствии метилового оранжевого) расход ее больше, чем при первом (в присутствии фенолфталеина), то раствор щелочи использован полностью и весь едкий натр перешел в соду и бикарбонат натрия.

Раствор соляной кислоты получают, растворив 3,5 *мл* соляной кислоты (плотность 1,19 *г/см*$^3$) водой до 1 *дм*$^3$. Раствор фенолфталеина готовят, растворяя 1 *г* твердого фенолфталеина в 60 *мл* спирта, с последующим разбавлением 40 *мл* воды. Раствор метилового оранжевого получают, растворив 0,1 *г* твердого метилового оранжевого в 100 *мл* воды.

## 13.9. КОНТРОЛЬ ЖИДКОГО КИСЛОРОДА НА СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕВОДОРОДОВ И ДРУГИХ ПРИМЕСЕЙ

Контроль жидкого кислорода на содержание углеводородов (ацетилена и других непредельных и предельных углеводородов) и прочих примесей имеет важнейшее значение для обеспечения безопасной эксплуатации воздухоразделительной установки. Организации данного контроля должно уделяться самое серьезное внимание со стороны обслуживающего персонала цеха. При осуществлении контроля применяют следующие методы:

| Определяемое вещество | Методы анализа | Инструкция ВНИИкриогенмаш или прибор |
|---|---|---|
| Ацетилен | Конденсационно-колориметрический | БО-375 (СВ 7628-Б) |
| | Хроматографический | № 1235а |
| Индивидуальные предельные и непредельные углеводороды | Хроматографический | № 1235а |
| Сумма углеводородов | Титрометрический | СВ-7633-ИОЛ |
| | Электрокондуктометрический | ИО-576 |
| | Хроматографический непрерывный | Прибор «Гамма» |
| Масло | Нефелометрический | БО-85Б |
| | Флуоресцентный | БО-173А |
| Сероуглерод | Конденсационно-колориметрический | БО-299-а |

### 13.9.1. Определение ацетилена и других углеводородов

**Конденсационно-колориметрический метод определения содержания ацетилена.** Перед отбором пробы контролируемого сжиженного газа (кислорода, обогащенного воздуха) необходимо слить 1—2 *л* жидкости из вентиля слива, после чего отобрать необходи-

мое количество ее для проведения анализа в сосуд с крышкой или непосредственно в предварительно охлажденную колбу-испаритель. Цилиндрический сосуд для отбора проб имеет обычно диаметр 160 *мм*, высоту 320 *мм*, снабжен крышкой и ручкой. Пробы можно отбирать в металлический сосуд Дьюара емкостью 5 *л*. Из взятой пробы отбирают 250 *мл* жидкого кислорода в стеклянную колбу-испаритель емкостью 300 *мл*, помещенную в деревянный ящик со шлаковой ватой; колбу охлаждают снаружи жидким кислородом. Шлаковая вата в ящике не должна быть загрязнена маслом, тряпками, бумагой и т. п.; шелковую и хлопковую вату употреблять нельзя из-за опасности ее воспламенения в кислороде.

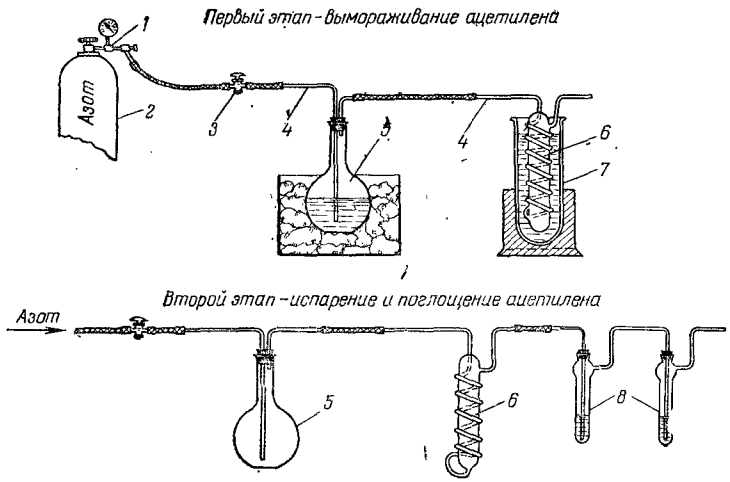



Рис. 13.24. Схема определения ацетилена в жидком кислороде конденсационно колориметрическим способом:

*1* — редукционный вентиль; *2* — баллон с азотом; *3* — кран; *4* — трубки; *5* — колба с пробой жидкого кислорода; *6* — змеевик-конденсатор; *7* — стеклянный сосуд Дьюара с жидким кислородом; *8* — поглотители.

Пробы жидкости из куба нижней колонны (по 0,5 *л*) отбирают в стеклянную колбу емкостью 0,6 *л*, также помещенную в деревянный ящик со шлаковой ватой.

Ацетилен в жидком кислороде определяют конденсационно-колориметрическим способом (рис. 13.24). Поместив соответствующее количество анализируемого жидкого кислорода в колбу *5*, закрывают ее пробкой с двумя стеклянными трубками *4*. Затем колбу присоединяют к стеклянному змеевику-конденсатору *6* при помощи резинового шланга и закрывают кран *3*. Пробку и кран предварительно испытывают на герметичность.

Из колбы *5* продукты испарения анализируемой жидкости проходят через змеевик-конденсатор *6*, погруженный в сосуд Дьюара с жидким кислородом. При этом содержащийся в анализируемой пробе ацетилен вымерзает в змеевике. Для охлаждения змеевика в сосуде Дьюара используют кислород, оставшийся после отбора пробы. Применение для этого жидкого азота или обогащенного воздуха недопустимо, так как в змеевике может начаться конденсация пропускаемого через него кислорода, в котором определяют содержание ацетилена.



Для предупреждения возможной конденсации кислорода в змеевике рекомендуется вводить в колбу *5* газообразный азот (через реометр со скоростью 250—300 *мл/мин*), который затем удаляется вместе с кислородом через змеевик в атмосферу.

По мере испарения кислорода колбу *5* освобождают от изоляции. Перед окончанием испарения колбу полностью вынимают из ящика. Продолжительность испарения всей пробы 1,5—2 *ч*. Необходимо следить, чтобы змеевик-конденсатор был полностью погружен в жидкий кислород.

После испарения из колбы всей жидкости аппаратуру в течение 4—5 *мин* продувают азотом из баллона *2* через редукционный вентиль *1* или азотом, отбираемым непосредственно из-под крышки конденсатора воздухоразделительного аппарата, для удаления из аппаратуры кислорода и вытеснения в змеевик *6* оставшегося в колбе ацетилена.

Продувку производят медленным током азота (1—2 пузырька в *сек*); содержание кислорода в продувочном азоте не должно превышать 3—7%, так как кислород мешает определению, придавая поглотительному раствору синюю окраску.

По окончании продувки к змеевику присоединяют два поглотителя *8*, в которых находится по 10 *мл* поглотительного раствора, смешанного с 2%-ным раствором желатины. Змеевик вынимают из сосуда, отогревают и систему вновь продувают азотом. Ацетилен при этом испаряется и вместе с азотом попадает в поглотители. Скорость поступления газа в поглотительные сосуды не должна превышать 1—2 пузырька в *сек*. Раствор во втором (контрольном) поглотителе не должен окрашиваться; при появлении окраски в нем следует уменьшить скорость поступления газа в поглотители. После отогрева змеевика-конденсатора до комнатной температуры систему дополнительно продувают медленным током азота в течение 5—8 *мин*.

В результате взаимодействия ацетилена с поглотительным раствором получается раствор ацетиленистой меди красновато-фиолетового цвета. Чем больше ацетилена содержится в пробе, тем гуще окраска раствора. Для количественного определения ацетилена используют стандартные (образцовые) растворы, которым придана окраска, соответствующая окраске с известным содержанием ацетилена. Путем сравнения окраски поглотительного раствора с окраской образцов определяют содержание ацетилена в пробе жидкого кислорода.

Способ приготовления шкалы стандартных растворов описан в ГОСТ 6331—68 «Кислород жидкий технический и медицинский».

Общее количество ацетилена в пробе равно сумме количеств е в двух поглотителях и выражается в кубических сантиметрах ац тилена на 1 *л* жидкости.

Сравнивать с образцами можно только такие растворы, соде жание ацетилена в которых не превышает 0,1 *мл*. Растворы, соде жащие более 0,1 *мл* ацетилена, разбавляют дополнительным кол чеством поглотительного раствора для получения менее интенси ной окраски; разбавление можно производить не более чем 1 : Таким образом, при отборе на анализ 0,25 *л* жидкости этим мет дом можно определить до 1,6 *мл* ацетилена в 1 *л* анализируемо жидкости*.

**Примеры:** 1. При сравнении неразбавленных поглотительны растворов окраска их соответствовала окраске стандартных ра творов, содержащих 0,09 и 0,02 *см*³ ацетилена.

Общее количество ацетилена в анализируемой пробе равно:

$$0,09 + 0,02 = 0,11 \text{ см}^3$$

2. При сравнении окраска поглотительных растворов соответс вовала окраске стандартных растворов с содержанием 0,05 0,01 *см*³ ацетилена, причем раствор в первом поглотителе был ра бавлен в 3 раза. Общее содержание ацетилена равно:

$$0,05 \cdot 3 + 0,01 = 0,16 \text{ см}^3$$

Чтобы отнести полученные в обоих случаях результаты анали к 1 *л* анализируемой жидкости, их нужно умножить на четыр Следует учесть, что действительное содержание ацетилена в жи ком кислороде из конденсатора будет на 5%, а в жидкости из к ба — на 15—20% ниже определенного анализом, так как при отб ре пробы жидкость частично испаряется. Поэтому полученные р зультаты анализа жидкого кислорода из конденсатора следу умножить на коэффициент 0,95, а результаты анализа жидкости куба — на коэффициент 0,8.

**Хроматографический метод****. Конденсационно-колориметри ский метод определения содержания ацетилена довольно длитель поэтому разработан хроматографический метод, позволяющий большой точностью установить содержание ацетилена и других у леводородов (от $C_2$ до $C_6$) в кислороде, воздухе, азоте и инертн газах. При этом длительность анализа сокращается.

Сущность этого метода заключается в предварительном обо щении микропримесей углеводородов в специальном концентрат

* Концентрацию ацетилена в окрашенных растворах можно опреде фотоколориметром ФЭК-М или ФЭК-Н-57. Метод измерения дан в инструк к прибору. Способ градуировки фотоколориметра описан в инструкции БО (СБ-7628Б) ВНИИкриогенмаш.

** Е. В. Вагин, Хроматографический метод определения микропр сей углеводородов, Труды ВНИИКИМАШ, вып. 10, Изд. «Машиностро 1965. См. также Инструкцию ВНИИкриогенмаш № 1235*а*.



при низкой температуре и использовании высокочувствительного пламенно-ионизационного способа детектирования*. Чувствительность метода $10^{-8}$—$10^{-9}$% об.

Принципиальная схема определения микропримесей ацетилена и других углеводородов в воздухе хроматографическим методом приведена на рис. 13.25. Анализируемую газовую смесь пропускают через концентратор *6*, помещенный в сосуд Дьюара *5* с охлаждающей жидкостью. В концентраторе примеси в пробе вымерзают и накапливаются. Затем в прибор подают азот (газ-проявитель), а концентратор погружают в сосуд с теплой водой и анализируемые

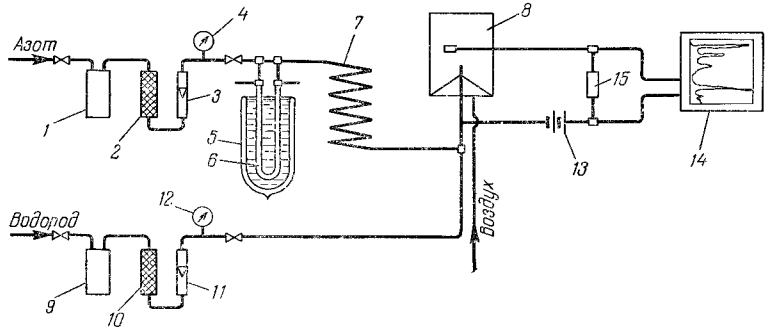



Рис. 13.25. Принципиальная схема определения микропримесей ацетилена хроматографическим методом:

*1*, *9* — промежуточные емкости; *2*, *10* — силикагелевые адсорберы; *3*, *11* — ротаметры; *4*, *12* — манометры; *5* — сосуд Дьюара с жидким кислородом; *6* — концентратор; *7* — хроматографическая колонка; *8* — пламенно-ионизационный детектор; *13* — батарея электропитания; *14* — самописец; *15* — потенциометр.

примеси испаряются. Система кранов позволяет направить испаренную пробу из концентратора в хроматографическую колонну *7*, где и осуществляется разделение анализируемых компонентов смеси.

Затем с помощью детектора *8*, питаемого водородом, производят хроматографический анализ, результаты которого записываются на ленту самописцем *14* в виде кривой с пиками различной высоты, соответствующими содержанию определяемых примесей. Подаваемое количество смеси и водорода регулируют по ротаметрам *3* и *11*. Секундомером определяют время пропускания смеси и появления отдельных пиков. Полученную кривую расшифровывают по данным ранее сделанной калибровки хроматографа для смесей с известными концентрациями примесей углеводородов, пользуясь для этого графиками и таблицами, сделанными при калибровке. Общая продолжительность анализа составляет 45—60 *мин*, из которых 10 *мин* занимает отбор пробы и 10—12 *мин* охлаждение адсорбента.

* Анализ микропримесей углеводородов в воздухе, кислороде, азоте и инертных газах может быть осуществлен на любом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором (Цвет-1, 2 и 4; Микро-1 и 2; ЛХМ-8М).

Ход анализа подробно описан в инструкции ВНИИкриогенмаш № 1235*а*.

**Экспрессный метод анализа на содержание ацетилена.** Для установок небольшой производительности или при малом накоплении жидкости в период пуска крупных блоков разделения воздуха можно применять экспрессный метод определения ацетилена в жидком воздухе и жидком кислороде*. Этот метод отличается простотой, резко сокращает время на анализ и расход жидкости для взятия проб.

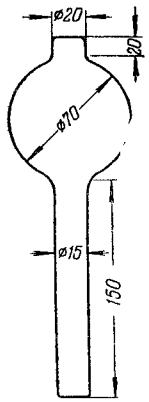



Рис. 13.26. Прибор для быстрого определения ацетилена в жидком кислороде.

Прибор для быстрого определения ацетилена показан на рис. 13.26. Он представляет собой шаровой стеклянный сосуд с пальцеобразным отростком, на дно которого помещают кусочек стеклоткани марки 60/70 или 40/70 ЭСРБ, размером 10×25 *мм*. На шаровой части сосуда наносится метка, соответствующая объему 125 *мл*. Сосуд для анализа охлаждают погружением на 1—2 *мин* в сосуд Дьюара с жидким кислородом или азотом так, чтобы жидкость не попала внутрь сосуда.

В охлажденный сосуд вливают 125 *мл* анализируемой жидкости, укрепляют его в штативе и дают пробе жидкости медленно испариться. При этом ацетилен сорбируется стеклотканью и остается в сосуде. После полного испарения жидкости и оттаивания шаровой части сосуда (прекращается потрескивание в сосуде) в него вливают 5 *мл* поглотительного раствора, применяемого при анализе на ацетилен конденсационно-колориметрическим методом. В присутствии ацетилена раствор окрашивается в красно-фиолетовый цвет; затем раствор вливают в пробирку для колориметрирования и сравнивают его цвет с эталонами стандартной колориметрической шкалы. Содержание ацетилена в пробе будет равно

$$x = 4a$$

где $a$ — содержание ацетилена, соответствующее эталону шкалы, *мл*.

Установлено, что найденное экспрессным методом содержание ацетилена меньше найденного стандартным методом на следующую величину:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Содержание ацетилена по экспрессному методу, *мл* в 1 *л* жидкого кислорода . . . . . | 0,02—0,04 | 0,04—0,12 | 0,12—0,24 |
| Содержание ацетилена меньше, чем при стандартном методе на, % . . | 50 | 25—30 | 18—20 |

* Н. М. Дыхно, Н. Н. Кудряшова, Полуколичественный экспрессный метод определения ацетилена в жидком кислороде, Гипрокислород, Кислородная промышленность, № 2, НИИТЭХИМ, 1969.



### 13.9.2. Определение масла, механических примесей и влаги

Определение масла в жидком кислороде производят качественным и количественными методами анализа.

**Качественный метод.** Пробу жидкого кислорода (1 *л*) наливают в стеклянную колбу и испаряют. После полного испарения пробы на внутренней поверхности колбы не должно оставаться пленки масла, капелек влаги и твердых частиц.

**Количественные методы.** Для количественного определения содержания масла в жидком кислороде и жидком воздухе используются нефелометрический и люминесцентный методы.

Нефелометрический метод. Отобранную в стеклянную колбу пробу жидкого кислорода (1 *л*) медленно испаряют в течение 1—1,5 *ч*. После этого в колбу вливают 2 *см*³ этилового эфира, быстро омывают дно и стенки колбы и выливают в анализную пробирку. Затем в колбу вносят последовательно 2 *см*³ уксусной кислоты и 5 *см*³ дистиллированной воды. Каждый из растворов после обмывания им колбы выливают в анализную пробирку. Сравнивают мутность эмульсии в анализной пробирке с мутностью эталонов нефелометрической шкалы. Сравнение следует производить строго через 5 *мин* после вливания уксусной кислоты. Содержание масла в *мг/л* жидкого кислорода определяют по таблице эталонов. Чувствительность нефелометрического метода составляет 0,01 *мг* масла в 1 *дм*³ жидкого кислорода.

Люминесцентный метод. Этот метод основан на свойстве минеральных масел флуоресцировать под действием ультрафиолетовых лучей. Для определения содержания масла этим методом применяют следующие приборы:

люминесцентный компаратор ЛК-1 (конструкция «Южэнергометаллургпром»);

фотоэлектрический флуориметр ФЛЮМ;

аппарат для флуоресцентного анализа витаминов в растворах, модель 833.

Чувствительность люминесцентного метода зависит от природы растворенного масла, растворителя и типа применяемого прибора (табл. 13.5).

Для проведения анализа 10 *мл* испытуемого раствора вливают в кювету прибора ФЛЮМ, измеряют интенсивность люминесценции раствора и по градуировочному графику определяют концентрацию масла в растворе.

При пользовании аппаратом модели 833 испытуемые растворы подносят к ультрафиолетовому фильтру УФС-3 и обнаруживают присутствие масла по свечению раствора при его облучении в приборе. Для количественного определения сравнивают свечение испытуемого раствора, влитого в анализную пробирку, со свечением эталонных растворов, подбирая эталон равного свечения.

Таблица 13.5. **Пороговая чувствительность люминесцентных приборов при определении масла в четыреххлористом углероде**

(в *мг/л*)

| Приборы | Масла | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | брайтсток П-28 | авиационное МС-20 | индустриальное 50 (машинное СУ) | турбинное 22 (Л) | веретенное АУ |
| ЛК-1 | 0,5 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| ФЛЮМ | 1 | 5 | 5 | 20 | 20 |
| Аппарат для анализа витаминов, модель 833 | 1 | 10 | 5 | 20 | 20 |

При использовании компаратора ЛК-1 сравнивают интенсивность люминесценции исследуемого и эталонных растворов.

Применяется следующая шкала эталонных растворов масла:

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Номер эталона . . . . . | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Стандартный раствор масла, *мл* . . . . . | 0 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 |
| Дихлорэтан или четыреххлористый углерод, *мл* . . . | 10 | 9,95 | 9,9 | 9,8 | 9,5 | 9,0 | 8,5 | 8,0 | 7,0 | 6,0 | 5,0 |
| Содержание масла, *мг* . . . | 0 | 0,005 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |

Стандартный раствор масла готовят так: 10 *мг* масла, взвешенного с точностью до 0,1 *мг*, растворяют в небольшом количестве растворителя, переносят в мерную колбу на 100 *мл* и доводят до метки растворителем. Используется масло того сорта, присутствие которого наиболее вероятно в анализируемой пробе. Растворитель — четыреххлористый углерод или дихлорэтан ч. д. а. При анализе применяют растворитель той же чистоты, что и в эталонных растворах. Срок годности шкалы 1 месяц.

Нефелометрический и люминесцентный методы могут применяться также при количественном определении содержания масла в растворителях*, используемых для обезжиривания кислородной аппаратуры, а также при определении содержания масла на поверхности изделий и в воде.

### 13.9.3. Определение сероуглерода

Метод определения сероуглерода в жидком кислороде и жидком воздухе основан на образовании желто-бурого дитиокарбамата меди при взаимодействии сероуглерода с диэтиламином. Содержание

* При концентрации масел и жиров в растворителях более 50 *мг/л* ВНИИкриогенмаш рекомендует весовой метод, по инструкции БО-305.



сероуглерода определяют колориметрически по стандартной шкале. Чувствительность метода 0,0005 *мг* сероуглерода в анализируемом объеме поглотительного раствора, что соответствует 0,004 *мг* сероуглерода в 1 *л* жидкого кислорода (при объеме пробы 250 *мл*) и 0,02 *мг* в 1 $м^3$ воздуха (при пробе 50 $дм^3$).

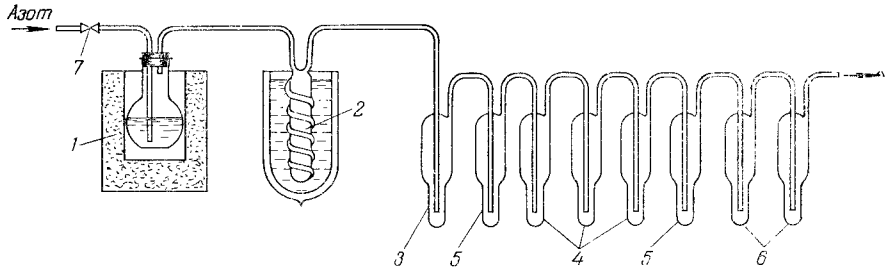



Рис. 13.27. Схема определения сероуглерода в жидком кислороде:

*1* — колба-испаритель; *2* — змеевиковый конденсатор; *3* — поглотительный сосуд для сероводорода; *4* — поглотительные сосуды для сероуглерода; *5* — поглотительные сосуды-каплеотбойники; *6* — поглотительные сосуды для ацетилена (при совместном определении); *7* — зажим.

Определение сероуглерода в жидком кислороде можно производить одновременно с определением ацетилена, в одной и той же пробе. Схема определения сероуглерода в жидком кислороде дана на рис. 13.27. Пробу для анализа отбирают так же, как и при определении ацетилена. Методика анализа и указания по приготовлению реактивов и эталонов колориметрической шкалы изложены в инструкции ВНИИкриогенмаш № БО-299-а.

## 13.10. КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В КРИПТОНОВОМ КОНЦЕНТРАТЕ

При получении бедного криптоно-ксенонового концентрата в основном воздухоразделительном блоке и последующем обогащении этого концентрата в установке УСК-1М повышается содержание ацетилена и других углеводородов (преимущественно метана) в криптоновом концентрате. Поэтому первичный криптоновый концентрат, концентрат после печей первого и второго выжиганий анализируют через каждые 4 *ч*, а сырой криптон из блока концентрирования и после печей третьего выжигания — при сливе. При этих анализах определяют ацетилен и общее количество углеводородов (сумму) в концентрате. Содержание углеводородов в пересчете на углерод выражают в миллиграммах на 5 $дм^3$ анализируемой жидкости.

Утвержденные нормы содержания углеводородов (*мг*/5 *дм*³) в криптоновом концентрате приводятся ниже:

| | Норма содержания |
|---|---|
| Первичный криптоновый концентрат | 2000 |
| Концентрат после печей первого выжигания | 20—40 |
| Концентрат после печей второго выжигания | 5—10 |
| Сырой криптон из блока концентрирования | 500 |
| Сырой криптон после печей третьего выжигания | 25—40 |

Приборы, применяемые для определения углеводородов, были указаны выше (см. табл. 13.4).

Определение ацетилена в криптоновом концентрате конденсационно-колориметрическим методом имеет некоторые особенности, вызванные тем, что в змеевике для вымораживания ацетилена может конденсироваться кислород. Причинами этого являются повышенное содержание азота в кислороде, используемом для охлаждения змеевикового конденсатора, по сравнению с криптоновым концентратом, а также сопротивление аналитической установки. При конденсации кислорода в змеевике возможны значительные потери ацетилена, что приводит к неверным результатам анализа. Поэтому пробу жидкого криптонового концентрата при определении ацетилена следует испарять в токе газообразного азота.

Анализ криптонового концентрата в данном случае выполняют следующим образом. В схему собранной анализной установки перед колбой-испарителем включают реометр, которым устанавливают расход азота, равный 100—120 *мл/мин*. В колбу-испаритель, помещенную в ящик со шлаковой ватой, вливают 250 *мл* криптонового концентрата и плотно закрывают ее резиновой пробкой с двумя отводными трубками. К длинной трубке присоединяют реометр, к короткой — змеевиковый конденсатор, погруженный в стеклянный сосуд Дьюара с жидким кислородом. Пробу криптонового концентрата испаряют в течение 1 *ч*. Содержащийся в пробе ацетилен испаряется и вымораживается в конденсаторе, который должен быть погружен полностью в жидкий кислород. К концу испарения расход газообразного азота уменьшают до 50—60 *мл/мин*. После полного испарения пробы определяют содержание ацетилена так же, как и при анализе жидкого кислорода и жидкого воздуха.

## 13.11. КОНТРОЛЬ БАЛЛОНОВ НА СКЛАДЕ

Пустые баллоны, поступающие на склад от потребителей, необходимо проверять для установления пригодности их для наполнения. Проверку производит контролер (приемщик).

Наполнять можно только баллоны:

окрашенные в установленный цвет с нанесением соответствующих надписей и клейм;

испытанные гидравлически на пробное избыточное давление 225 *кгс/см*² и предназначенные для рабочего избыточного давления 150 *кгс/см*²;



без видимых наружных дефектов (трещин, вмятин, раковин, косо насаженных башмаков и пр.), а также следов грязи и масла;

снабженные вентилями, боковой штуцер которых имеет правую трубную резьбу $^3/_4$ дюйма.

Контролер должен проверить, не наступил ли срок очередного испытания баллона (дата выбита на верхней сферической части баллона). В баллоне должно оставаться небольшое 0,5 *кгс/см*² избыточное давление газа, что проверяется кратковременным открыванием вентиля. Одновременно необходимо убедиться в том, что выходящий из баллона газ не имеет запаха; в противном случае баллон немедленно изолируют от других баллонов и доводят об этом до сведения администрации цеха. Отбракованные баллоны ставят в специально отведенную часть склада и на каждом из них надписывают мелом причину забракования.

Наполненные кислородом баллоны контролер принимает на рампе, проверяет наполнение их кислородом до установленного (для данной окружающей температуры) давления, а также герметичность вентиля; вентиль должен быть закрыт колпаком.

Для проверки качества кислорода на соответствие требованиям ГОСТ 5583—68 отбирают 5% наполненных баллонов, но не менее двух баллонов из малых партий, состоящих менее чем из 30 баллонов.

## 13.12. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА КИСЛОРОДА

Основная задача автоматизации — поддержание оптимального режима работы воздухоразделительных установок, предупреждение нарушений установленного процесса и предотвращение аварий.

Автоматизация воздухоразделительных установок первоначально ограничивалась применением приборов для автоматического контроля процесса, автоматизации пуска машин, входящих в состав установки, автоматическим поддержанием некоторых параметров процессов теплообмена и разделения воздуха.

В последующие годы начали применять системы автоматического поддержания наивыгоднейшего режима при различном расходе кислорода и нагрузки по воздуху в зависимости от изменения потребления кислорода и внешних условий. Это имеет тем большее значение, чем выше производительность установки, так как отклонения от режима в крупных установках могут привести к ощутимым потерям вследствие увеличения расхода энергии и повышения себестоимости кислорода. Следует также учесть, что крупные установки обладают большой тепловой инерцией и восстановление нарушенного режима при ручном управлении требует больших усилий и продолжительного времени.

### 13.12.1. Автоматизация блоков разделения

В качестве примера рассмотрим схему автоматизации блока разделения установки БР-5, предназначенную для поддержания заданного режима работы. Скелетная схема автоматического регули-

рования установки низкого давления приведена на рис. 13.28. Перечень регуляторов установки низкого давления БР-5 дан в табл. 13.6. Дополнительно может быть предусмотрено устройство для автоматического регулирования подачи воздуха в блок разделения в зависимости от изменения отбора кислорода. Так как при переключении регенераторов резко меняются давления и подача в блок воздуха, то для исключения «ложной» работы регулирующих устройств применяется командный механизм. За 5—6 *сек* до переключения регенераторов этот механизм размыкает цепи управления регуляторов соотношения потоков и уровней в колоннах и вновь включает их через 25 *сек* после переключения. За этот промежуток времени потоки и уровни стабилизируются.

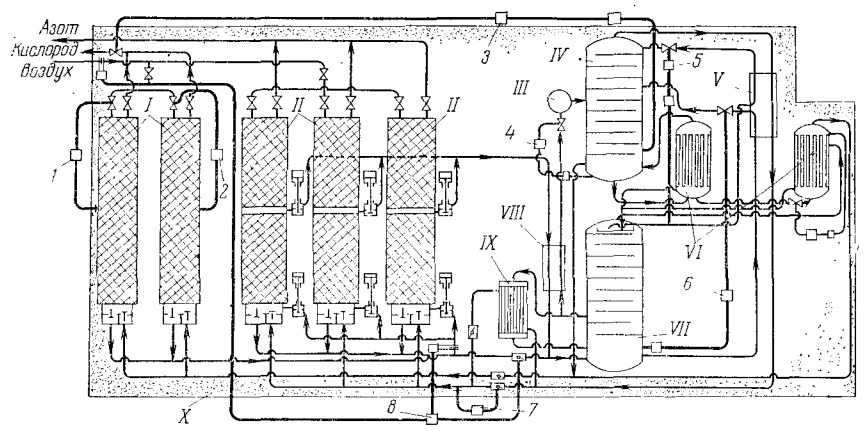



Рис. 13.28. Схема автоматического регулирования установки низкого давления: *I* — кислородные регенераторы; *II* — азотные регенераторы; *III* — турбодетандер; *IV* — верхняя колонна; *V* — переохладитель; *VI* — конденсаторы; *VII* — нижняя колонна; *VIII* — детандерный теплообменник; *IX* — подогреватель азота; *X* — кожух блока; *1*, *2* — регуляторы температуры в середине насадки кислородных регенераторов; *3* — регулятор концентрации отходящего кислорода; *4* — регулятор уровня кислорода в верхней колонне; *5* — регулятор концентрации азотной флегмы; *6* — регулятор уровня жидкости в кубе нижней колонны; *7* — регулятор температуры азота на холодном конце регенераторов; *8* — регулятор соотношения количеств воздуха, подаваемого в блок, и воздуха петли.

Концентрацию газов и жидкостей регулируют периодически, через каждые 9 *мин*, и регулятор воздействует на регулируемую величину только в том случае, если в этот момент концентрация отклонилась от заданной.

В схеме автоматизации предусмотрена также световая и звуковая сигнализация нарушения работы регуляторов, исчезновения напряжения в питающей сети и других неисправностей. Регулирующие приборы, сигнальные устройства и органы управления автоматической системы размещаются на специальном щите.

Одной из задач автоматизации воздухоразделительных установок является автоматическое регулирование работы регенераторов и поддержание в них постоянного температурного режима в задан



Таблица 13.6. **Автоматические регуляторы кислородной установки низкого давления БР-5**

| Регулятор | Датчик | | Регулирующий прибор | Регулирующий орган | |
|---|---|---|---|---|---|
| | тип | место установки | | тип | место установки |
| Температуры в середине насадки кислородного регенератора | Термометр сопротивления ТСП-823 | Кислородный регенератор (середина насадки) | Электронный автоматический мост ЭМП-269 с трехпозиционным регулятором | Двухседельный регулирующий клапан диаметром 200 *мм* | Трубопровод подачи воздуха в кислородный регенератор; на байпасе основной задвижки |
| Соотношения количеств воздуха, подаваемого в блок, и воздуха петли | Диафрагмы и дифманометры ДПЭС | Трубопровод подачи воздуха в блок и трубопровод петли перед регенераторами | Электронный регулирующий прибор ЭР-III (системы ВТИ) | Дроссельная заслонка диаметром 350 *мм*, специального профиля | Трубопровод подачи воздуха в нижнюю колонну |
| Температуры азота на холодном конце азотных регенераторов | Термометр сопротивления ТСП-823 | Трубопровод подачи азота в регенераторы (холодный конец) | Электронный регулирующий прибор ЭР-С (системы ВТИ) | Дроссельная заслонка диаметром 450 *мм*, специального профиля | Трубопровод подачи азота из подогревателя в регенераторы |
| Уровня жидкости в испарителе нижней колонны | Дифманометр ДМ-100 (системы ВТИ) | Присоединен к испарителю колонны | Электронный регулирующий прибор ЭР-III | Регулирующий жидкостный вентиль диаметром 15 *мм* | Трубопровод подачи жидкости из нижней колонны в верхнюю; на байпасе основного вентиля |
| Концентрации азотной флегмы | Датчик газоанализатора МГК-48 | Присоединен к трубопроводу азотной флегмы | Вторичный прибор газоанализатора с трехпозиционным регулятором | Регулирующий жидкостной вентиль диаметром 15 *мм* | Трубопровод подачи азотной флегмы из нижней колонны в верхнюю; на байпасе основного вентиля |
| Концентрации кислорода | Датчик газоанализатора МГК-48 | Отбор с первой гарелки верхней колонны | Вторичный прибор газоанализатора с трехпозиционным регулятором | Двухседельный регулирующий клапан диаметром 250 *мм* | Трубопровод выдачи кислорода из блока; на байпасе основной задвижки |
| Уровня кислорода в верхней колонне | Дифманометр ДМ-100 | Присоединен к нижней части верхней колонны | Электронный регулирующий прибор ЭР-III | Двухседельный регулирующий клапан диаметром 150 *мм* | Трубопровод подачи газа в турбодетандер; на байпасе основного вентиля |

ных пределах. Регулирование ведется по температуре в средней части (по высоте) насадки регенератора. Температурный режим регенератора определяется количеством и температурой газов прямого и обратного потоков на входе в регенератор. При регулировании изменяют или количество газа, поступающего в данный регенератор, или время его прохождения через насадку регенератора. При регулировании на прямом потоке могут использоваться оба принципа, а на обратном — только второй, так как количество газов обратного потока обусловлено работой ректификационной колонны и не может изменяться без нарушения ее режима. Применяют два способа регулирования режима работы регенераторов:

первый — на обоих регенераторах устанавливают по одному регулятору, каждый из которых поддерживает заданную температуру в середине насадки, изменяя количество газа прямого потока, проходящего через данный регенератор;

второй — на пару регенераторов устанавливают два регулятора: один для выравнивания средней температуры в регенераторах данной пары путем изменения длительности прохождения в них прямого и обратного потоков, а другой — для изменения количества газа прямого потока, поступающего в эту пару регенераторов.

Для кислородных регенераторов используют оба способа, для азотных — только второй. Азотные регенераторы с небалансирующимся потоком (петлей) автоматически регулируются изменением количества газа петли и температуры азота перед регенераторами. Если нагрузка блока разделения постоянна, тепловой режим азотных регенераторов устанавливают также постоянным, поддерживая неизменным количество петлевого воздуха. При переменной нагрузке блока ставят регулятор, который автоматически приводит в соответствие количество петлевого воздуха с количеством воздуха, поступающего в блок разделения. Конструктивное оформление систем автоматического регулирования работы регенераторов может быть различным.

На одном из заводов осуществлено автоматическое регулирование работы регенераторов установок КТ-1000 с использованием электрических исполнительных механизмов. Распределение потоков воздуха в отдельные регенераторы регулируется по изменению температуры в среднем сечении насадки. В качестве датчиков используются хромель-копелевые термопары в комплекте с регистрирующими потенциометрами ЭПП-120. Импульс от реостатного задатчика потенциометра поступает к исполнительному механизму (ИМ-2/120) мотыльковых дроссельных заслонок, установленных после задвижек на воздухопроводах подвода воздуха к каждому регенератору. Очередность подключения термопар к потенциометру и исполнительных механизмов к регулятору устанавливается электрическим переключающим устройством (команд-аппаратом), смонтированным на основном переключающем механизме клапанов регенераторов. Соответственно отключению от заданной температуры в средней части насадки, измеренной в конце периода теплого



дутья, исполнительный механизм изменяет положение дроссельной заслонки. Вследствие этого увеличивается (при переохлаждении насадки) или уменьшается (при перегревании насадки) подача воздуха в данный регенератор.

На Щекинском химическом комбинате разработана система автоматического регулирования температурного режима регенераторов блока разделения КТ-3600 и КТ-3600Ар с использованием мембранных сигнализаторов пневматической агрегатно-унифицированной системы (АУС) и пневматических исполнительных механизмов*.

В установках фирмы «Линде» (ФРГ) автоматическое регулирование теплового режима работы регенераторов осуществляется путем перераспределения количества воздуха между регенераторами в зависимости от изменения температуры в средней части насадки. С помощью регулирующего устройства, расположенного на механизме переключения клапанов регенераторов и действующего от электронного автоматического моста, изменяется длительность периода теплого дутья в каждой паре регенераторов.

Чем больше разность температур в средней части насадки смежной пары регенераторов установки «Линде», тем раньше происходит очередное переключение клапанов. Для поддержания одинаковой температуры в середине насадок у двух пар регенераторов на трубопроводе подачи воздуха в кислородные регенераторы устанавливают регулирующую заслонку. Если в установке имеется три пары регенераторов, регулирующие заслонки ставятся между каждой парой регенераторов, причем заслонки на второй и третьей парах снабжены одним приводом, так что открытие одной заслонки сопровождается прикрытием второй. Импульс на двигатели привода заслонок при отклонении фактической температуры от заданной подается термодатчиком, измеряющим температуру насадок через заданные промежутки времени.

На рис. 13.29 показана принципиальная схема автоматического регулирования процесса получения сырого аргона** на установке высокого давления КжАр-1,6 (КЖ-1Ар). Автоматически регулируются содержание кислорода в аргонной фракции с коррекцией по содержанию аргона в сыром аргоне, расход сырого аргона с коррекцией по содержанию кислорода на контрольной (52-й) тарелке и давление в верхней колонне.

Заданное содержание аргона в сыром аргоне обеспечивается каскадной схемой, в которой стабилизирующим регулятором поддерживается постоянство концентрации кислорода в аргонной

* Котенко Л. А., Немов Ю. Д., Ольховик В. Н., Гипрокислород, Кислородная промышленность, № 1, 1963.

** К. Н. Войнов, С. М. Корнилов, Т. Х. Безновская, И. С. Зурахинский, Г. А. Пантелейко, И. Б. Френкель, Автоматизация блока разделения воздуха высокого давления с аргонной колонной, Кислородная промышленность, № 1, Гипрокислород, изд. НИИТЭхим, 1969.

фракции путем изменения отбора газообразного кислорода из вер ней колонны. Задание стабилизирующему регулятору выдает ко ректирующий регулятор в зависимости от количества аргона в си ром аргоне. Использование содержания кислорода во фракции качестве регулируемого параметра обусловлено тем, что изменен количества азота во фракции происходит одновременно с измен нием в ней содержания кислорода. Концентрация азота во фракц составляет всего 1—1,5% и н посредственно не может бы измерена.

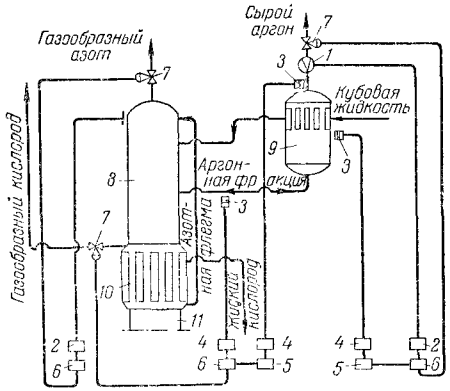



Рис. 13.29. Принципиальная схема автоматического регулирования процесса получения сырого аргона:

*1* — диафрагма; *2* — дифманометры; *3* — датчики газоанализатора; *4* — вторичные приборы газоанализаторов; *5* — корректирующие регуляторы; *6* — стабилизирующие регуляторы; *7* — регулирующие пневматические клапаны; *8* — верхняя колонна; *9* — аргонная колонна; *10* — основной конденсатор; *11* — нижняя колонна.

Основной причиной пов шения количества азота в с ром аргоне является рост ко центрации азота во фракци при этом повышение концен рации азота во фракции на 1 приводит к увеличению азо в сыром аргоне на 8—10%, ч обусловлено высокими знач ниями флегмовых чисел. Т как уменьшению количест азота в сыром аргоне сопут вует увеличение концентрац аргона в сыром аргоне, то э использовано для непосред венного измерения содержан аргона в сыром аргоне.

Содержание кислорода сыром аргоне повышается п увеличении производитель сти аргонной колонны, прич этому предшествует возрас ние концентрации кислорода на тарелках аргонной колонны. П этому производительность аргонной колонны регулируется по м менению содержания кислорода на контрольной 52-й тарелке. З данная концентрация кислорода в сыром аргоне поддерживает также с помощью каскадного регулятора. При этом стабилизиру щий регулятор обеспечивает постоянный отбор сырого аргона, корректирующий регулятор изменяет задание в зависимости от держания кислорода в жидкости на контрольной тарелке.

Давление в верхней колонне поддерживается регулятором, меняющим степень открытия клапана на трубе отбора газообраз го азота из верхней колонны.

В качестве датчиков применяются автоматические магнит газоанализаторы МН-5130 (для определения кислорода в аргон фракции) и термокондуктометрические ТКГ-4 (для определен аргона в сыром аргоне).

Для измерения расхода сырого аргона и давления в верхней к



лонне используются соответственно дифманометры ДМПК-4 (в комплекте с диафрагмой) и ДМПК-100. Регистрация параметров, указание положения клапана и установка задания осуществляются приборами ПВ10-1Э системы «Старт», предназначенными для использования в каскадных системах автоматического регулирования. В схеме применены регулирующие блоки 4РБ-32А, в качестве регулирующих органов используются пневматические клапаны. Питание приборов автоматики производится осушенным и очищенным от механических примесей сжатым воздухом, отбираемым после блоков осушки. После автоматизации получены следующие параметры процесса:

| | Кислород | Азот | Аргон |
|---|---|---|---|
| Состав аргонной фракции, % | 91,77 | 0,88 | 7,35 |
| Состав сырого аргона, % | 4,02 | 4,15 | 91,83 |

### 13.12.2. Автоматизация воздушных турбокомпрессоров

Воздушные турбокомпрессоры воздухоразделительных установок оснащены устройствами автоматического контроля и регулирования: системой дистанционного измерения температуры воздуха в секциях компрессора, температуры подшипников редуктора и главного электродвигателя с сигнализацией предельных температур в подшипниках; системами дистанционного измерения давления воздуха на выходе из секций компрессора, давления масла (поступающего на смазку подшипников), разрежения воздуха на входе в первую секцию компрессора, уровня в масляном баке, осевого сдвига ротора компрессора и расхода воздуха (определяющего производительность компрессора); дроссельной заслонкой с гидравлическим сервомоторным приводом для автоматического регулирования производительности турбокомпрессора.

Турбокомпрессоры снабжаются также автоматическим противопомпажным устройством для частичного выпуска воздуха в атмосферу при работе на малых расходах, а также устройствами для автоматического отвода воды из промежуточных и концевого воздухоохладителей.

При аварийном осевом сдвиге ротора вследствие износа упорных колодок подшипника специальное реле автоматически отключает главный электродвигатель турбокомпрессора.

На трубопроводе подвода воды к воздухоохладителям устанавливается автоматическое устройство, отключающее электродвигатель в случае уменьшения расхода воды ниже допустимого. При аварийном повышении температуры одного из вкладышей подшипника агрегата также происходит автоматическое выключение главного электродвигателя.

Предупреждающие сигналы фиксируют: предельный уровень масла в маслобаке; осевой сдвиг ротора компрессора на 0,5 *мм;* падение давления масла для смазки подшипников; уменьшение потока воды на каждом воздухоохладителе.

Аварийная сигнализация извещает о предельном снижении давления масла в подшипниках, предельном падении давления воды, осевом сдвиге ротора компрессора до 1 *мм* и об остановке главного электродвигателя.

Основные задвижки компрессора снабжены электроприводом с дистанционным управлением.

Специальное реле автоматически включает резервный маслонасос при понижении давления масла.

### 13.12.3. Автоматизация кислородных турбокомпрессоров

Для кислородных турбокомпрессоров КТК-7 и КТК-12,5 конструкции ВНИИкимаш разработано устройство автоматического пуска по заданной программе. При нажатии кнопки «пуск

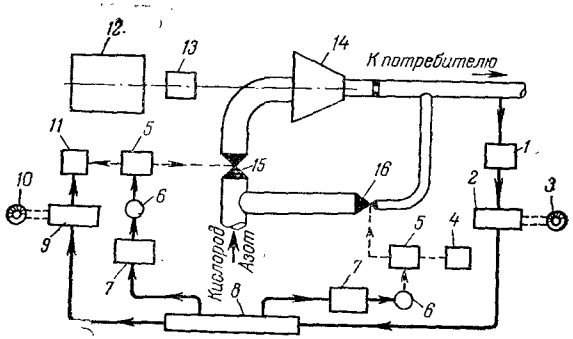



Рис. 13.30. Принципиальная схема автоматического регулирования работы кислородного турбокомпрессора:

*1* — индукционный датчик давления; *2* — электронный регулятор; *3* — задатчик давления; *4* — колонка дистанционного управления типа КДУ-I; *5* — редукторы сервопривода; *6* — электродвигатели сервопривода; *7* — магнитные пускатели; *8* — регулирующий блок; *9* — электронный следящий прибор; *10* — регулятор положения всасывающей заслонки; *11* — колонка дистанционного управления типа КДУ-II; *12* — синхронный электродвигатель; *13* — редуктор; *14* — турбокомпрессор; *15* — дроссельная заслонка; *16* — байпасный клапан.

(рис. 13.30) автоматически выполняются последовательно следующие операции: проверка правильности положения запорных органов турбокомпрессора перед пуском; включение пускового масляного насоса; подача воды в холодильники; пуск синхронного электродвигателя турбокомпрессора; отключение пускового механизма; продувка турбокомпрессора азотом и прогрев его в течение 5-20 *мин* до рабочих температур; отключение подачи азота, подача в турбокомпрессор кислорода и нагрузка его до установленной величины; выдача сжатого кислорода потребителям.

Турбокомпрессор снабжен устройством для автоматического поддержания постоянного давления нагнетания независимо от изменения расхода кислорода, а также устройством антипомпажной защиты. В этом устройстве чувствительным элементом является ин-



дукционный датчик давления *1*, установленный на кислородном коллекторе и воздействующий на вход электронного регулятора *2*, который, в свою очередь, действует на всасывающую дроссельную заслонку *15* и байпасный клапан *16* турбокомпрессора *14*. Операции остановки компрессора выполняются последовательно также автоматически, при нажатии кнопки «Стоп».

Защитными устройствами автоматически контролируются основные точки, в которых могут возникнуть нарушения режима работы, когда требуется немедленная остановка турбомашины (например, падение давления масла и расхода воды, повышение температуры подшипников, осевое смещение ротора и др.). Если в компрессоре произойдет загорание и температура превысит допустимый предел, мгновенно отключается подача кислорода в турбокомпрессор и он заполняется азотом.

### 13.12.4. Автоматизация турбодетандеров

Основным автоматическим устройством в турбодетандерном агрегате является система защиты от разноса в случае исчезновения напряжения в сети электрогенератора. На рис. 13.31 показана схема такой защиты для турбодетандера воздухоразделительного бло-

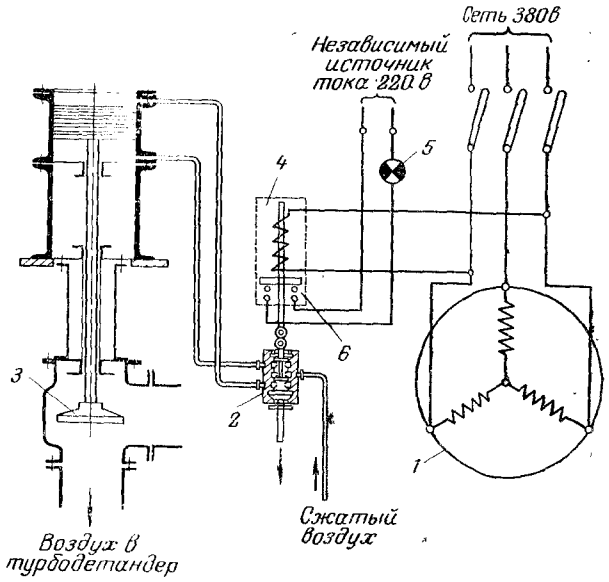



Рис. 13.31. Принципиальная схема автоматической защиты турбодетандера от разноса:

*1* — электрогенератор турбодетандера; *2* — воздухораспределитель; *3* — отсечный клапан с воздушным сервоприводом; *4* — электромагнитный выключатель; *5* — сигнальная лампа; *6* — блокировочный контакт.

ка БР-1. При исчезновении напряжения на клеммах электрогенератора *1* якорь электромагнитного выключателя *4* открывает клапан воздухораспределителя *2*, через который сжатый воздух поступает в приказной цилиндр отсечного клапана *3* и закрывает последний; этим прекращается доступ воздуха в сопла направляющего аппарата турбодетандера. Одновременно блокировочный контакт *6* включает сигнальную лампу *5* на щите управления. В других схемах автоматизации турбодетандерных агрегатов предусматриваются также устройства для автоматического управления работой пусковых масляных насосов, автоматического отключения турбодетандера при повышении числа оборотов его вала сверх допустимого предела, автоматического выключения при чрезмерном давлении в зазоре между ротором и направляющим аппаратом, при снижении мощности турбодетандера и при понижении давления масла.

### 13.12.5. Автоматизация прочего оборудования воздухоразделительных цехов

Для повышения надежности работы и облегчения эксплуатации оборудования воздухоразделительных цехов кроме описанных выше применяются также следующие защитные и автоматические устройства: переключения шиберов на воздухозаборном трубопроводе в зависимости от направления ветра; дистанционного контроля работы воздухоочищающих масляных фильтров; защиты металлических газгольдеров от образования разрежения под колоколом и выключения при этом кислородных компрессоров; дистанционного измерения степени заполнения мягких газгольдеров; регулирования работы кислородных и азотных компрессоров в зависимости от графика потребления сжатого кислорода и азота; поддержания заданного давления, расхода и дозировки газов в коллекторах; обеспечения постоянства заданного температурного режима регенерации адсорбентов и переключения адсорберов при регенерации; автоматизации работы насосов системы водоснабжения; продувки масловлаго- и щелочеотделителей; контроля работы щелочных скрубберов, регулирования процесса азото-водяных холодильников; установок предварительного охлаждения воздуха с фреоновым компрессором; наполнительных рамп, реципиентов и др.

Для защиты от разноса поршневых детандеров также используются автоматические устройства, прекращающие подачу сжатого воздуха в цилиндр. Клапан закрывается при исчезновении напряжения на клеммах генератора или увеличении числа оборотов вала детандера на 10% сверх номинального.

### 13.12.6. Комплексная автоматизация

Для комплексной автоматизации наиболее пригодны впервые разработанные в СССР установки низкого давления, включающие два основных технологических узла — турбокомпрессор и блок разделения.



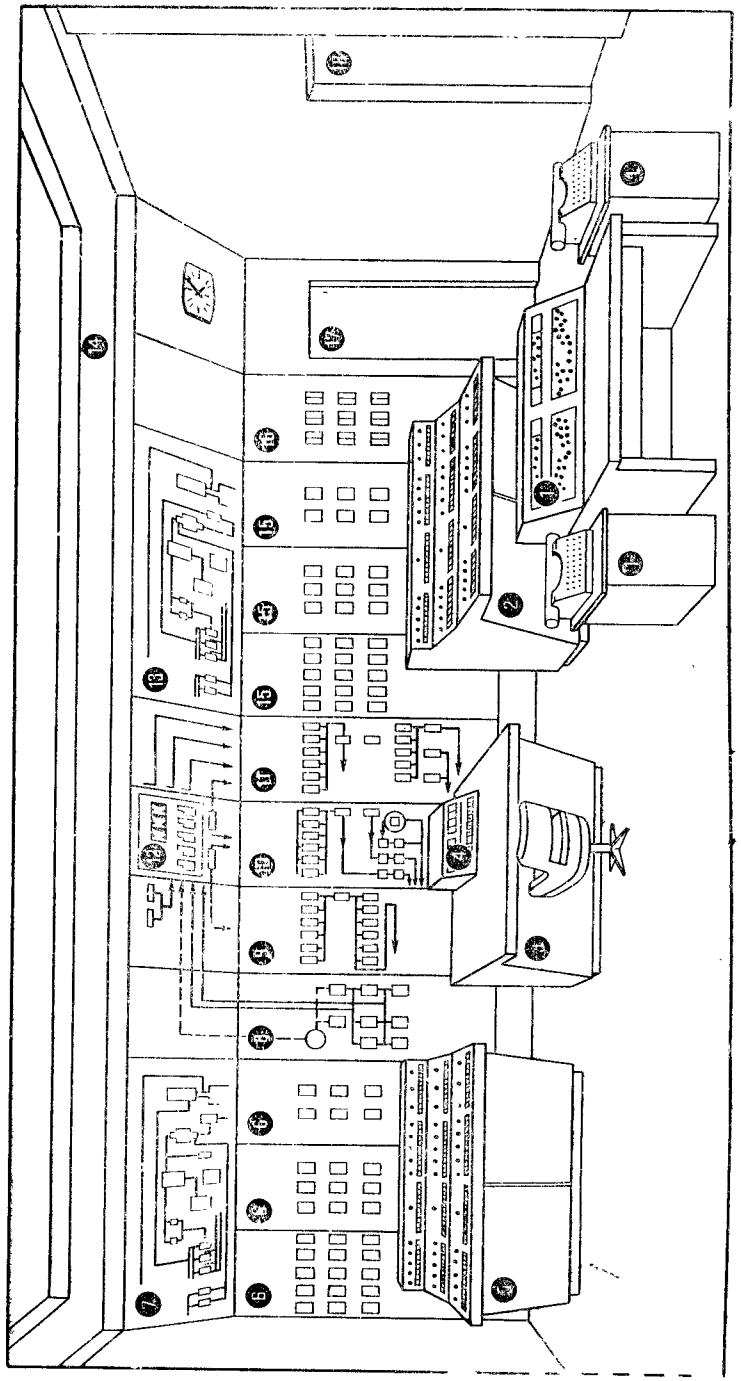


Рис. 13.32. Диспетчерский пункт управления цехом разделения воздуха:

*1* — управляющая вычислительная машина; *2* — пульт оператора блоков № 4, 5, 6; *3* — пульт главного оператора; *4* — сигнальные табло; *5* — пульт оператора блоков № 1, 2, 3; *6* — панели блоков разделения воздуха № 1, 2, 3; *7* — мнемосхема блоков № 1, 2, 3; *8* — панель «энергия»; *9* — панель «воздух»; *10* — панель «кислород»; *11* — панель «азот — криптон»; *12* — мнемосхема кислородного производства; *13* — мнемосхема блоков № 4, 5, 6; *14* — светорассеивающая панель; *15* — панели блоков разделения воздуха № 4, 5, 6; *16* — панель общецеховых параметров; *17* — вход в помещение за щитами; *18* — выход.

Проводимая в СССР комплексная автоматизация процессов в цехах разделения воздуха основана на применении современных приборов и систем автоматического контроля.

В связи с необходимостью контролировать большое число различных параметров целесообразно использовать информационные машины. Машина производит сбор и первичную обработку показателей, помогает аппаратчику-оператору получать быструю и точную информацию о ходе процесса, освобождает от необходимости обработки большого числа диаграмм. Использование таких машин позволяет упростить щиты контроля со вторичными приборами.

Особенно перспективно применение управляющих вычислительных машин для полной автоматизации управления процессами. Получая большое количество информации о ходе процесса от измерительных приборов, вычислительные машины производят необходимые расчеты и обеспечивают автоматическое управление технологическим процессом с оптимальными технико-экономическими показателями.

В качестве примера на рис. 13.32 показан диспетчерский пункт управления цехом разделения воздуха, оснащенный шестью блоками БР-1А, на одном из крупных химических комбинатов. Пункт управления разработан с учетом современных требований технической эстетики, предусматривающей наиболее рациональное размещение приборов контроля, автоматики и управления процессом. Для сбора информации о работе отдельных узлов и определения оптимальных параметров режима используется управляющая вычислительная машина УМ-1.

Автоматизации воздухоразделительных установок большое внимание уделяется и за рубежом. Например, фирма «Линде» (ФРГ) выпускает полностью автоматизированные установки низкого давления производительностью 275—4000 $м^3/ч$ кислорода. На время работы установки здание цеха закрывается, и только один раз в день или неделю (в зависимости от размеров агрегата) проверяется его состояние. В случае аварии установка может быть выключена из центрального диспетчерского пункта.

Необходимым условием безаварийной работы полностью автоматизированных установок является надежность всего оборудования, арматуры и контрольно-измерительных приборов, тщательное проведение в установленные сроки планово-предупредительного осмотра и ремонта и полное отогревание, осмотр и ремонт установки один раз в год.

ГЛАВА 14

# ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КИСЛОРОДА

## 14.1. ПРИЧИНЫ ВЗРЫВОВ

Основной причиной взрывов в аппаратах блоков разделения воздуха является накопление взрывоопасных примесей, присутствующих в небольших количествах в перерабатываемом воздухе.

Наиболее опасными из газообразных примесей воздуха являются ацетилен, кислородсодержащие и циклические углеводороды, сероуглерод, предельные и непредельные углеводороды и другие вещества, взрывоопасные в среде кислорода и воздуха. Представляют опасность масло (в виде паров и капель), попадающее в воздухоразделительный блок и его аппараты вместе с воздухом, а также продукты термического разложения масла в цилиндрах поршневых компрессоров при высоких температурах и давлениях сжатия. Кроме того, причиной некоторых взрывов явилось неудовлетворительное качество изготовления аппаратов (например, длиннотрубных конденсаторов) и монтажа блоков разделения воздуха. Поэтому основными способами защиты аппаратов от взрывов являются:

использование для переработки воздуха, в наименьшей степени загрязненного указанными примесями;

очистка перерабатываемого воздуха от взрывоопасных примесей;

проведение процесса разделения воздуха таким образом, чтобы содержание взрывоопасных примесей в жидком обогащенном воздухе и жидком кислороде не превышало установленных норм;

осуществление ряда мероприятий при конструировании, изготовлении и монтаже аппаратов и коммуникаций блоков разделения, направленных на исключение возможности местного накопления взрывоопасных примесей в различных частях аппарата, где нет достаточной проточности жидкости и возможно интенсивное ее выпаривание (в трубках и межтрубном пространстве конденсаторов, стояках, «утках» трубопроводов, арматуре и пр.).

Взрывы блоков разделения происходят относительно редко и в основном в тех случаях, когда вопросам техники безопасности уделяется недостаточное внимание или нарушаются технологический режим и правила контроля производства.

Чаще всего взрывы носят местный характер и приводят к ра рушению некоторых частей и узлов аппарата. Однако были взрыв большой силы, которые полностью выводили из строя воздухора делительный аппарат.

Места взрывов в воздухоразделительных аппаратах показан на рис. 14.1. Черными кружками отмечены участки, где взрывы пр исходили неоднократно; в остальных местах зафиксированы ед ничные случаи взрывов.

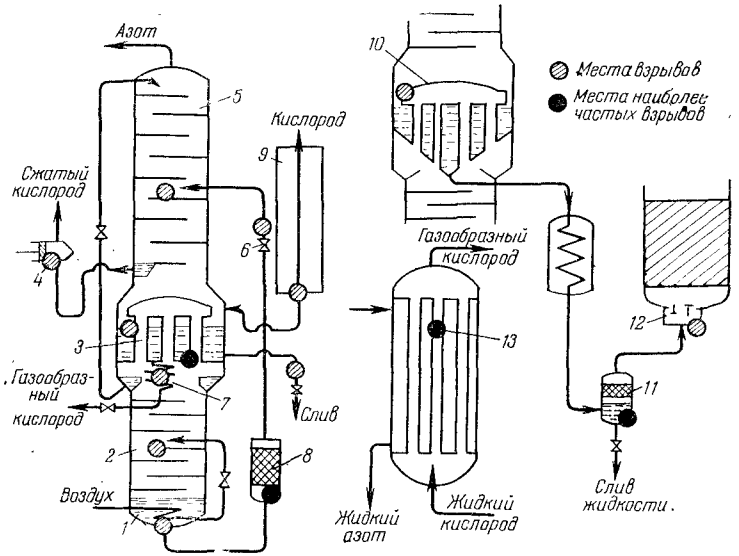



Рис. 14.1. Места взрывов в воздухоразделительных аппаратах:

*1* — куб нижней колонны (между витками змеевика); *2* — нижняя колонна (на тарелке вв жидкого воздуха); *3* — основной конденсатор (на поверхности трубок); *4* — насос жидк кислорода (в цилиндре и сальнике); *5* — верхняя колонна (на тарелке ввода кубовой ж кости); *6* — кислородный дроссельный вентиль (после вентиля); *7* — змеевик испарения ж кого кислорода установки Мессер (в трубках); *8* — адсорбер ацетилена (нижняя час *9* — теплообменник (холодный конец кислородной секции); *10* — основной конденс (в кольцевом углублении крышки, в месте расположения герметизирующей камеры); *11* - делитель ацетилена после основного конденсатора (вывод жидкости); *12* — клапанная робка кислородного регенератора (корпус коробки); *13* — трубки обращенного конд сатора. Взрывы в теплообменнике *9* и клапанной коробке *12* произошли при выбрасыва в них насыщенного ацетиленом жидкого кислорода и быстром его выпаривании.

Взрывы, как правило, происходили в установках, когда не бы предусмотрены меры против накопления ацетилена (применен адсорберов и др.) или где использовались компрессоры, сильно грязнявшие воздух маслом и продуктами его разложения (крек масла в цилиндрах в процессе сжатия). В установках с адсорбе ми взрывы происходили в случаях, когда нарушались правила э плуатации адсорбера и контроля содержания ацетилена в возду Зарегистрированы также микровзрывы в отдельных трубках к денсаторов с кипением кислорода в трубках, вызвавших ряд ав рийных остановок крупных блоков разделения воздуха, а так взрывы в конденсаторах установок малой производительности.



Иногда происходят взрывы трубопроводов, арматуры и отдель ых аппаратов блока разделения вследствие недостаточной естной прочности или дефектов материала; эти случаи е относятся к описываемым выше взрывам и здесь не рассматри аются.

## 14.2. ВЗРЫВООПАСНЫЕ ПРИМЕСИ ВОЗДУХА

**Ацетилен.** Среднее содержание ацетилена в 1 $м^3$ атмосферного оздуха может колебаться в пределах 0,001—0,1 $см^3$. Если вблизи т места забора воздуха компрессором производятся работы по га овой сварке и резке или находится ацетиленовая станция с ямами ля сбора и хранения карбидного ила, то количество ацетилена в $м^3$ воздуха может возрасти до 0,5—1 $см^3$, а в отдельные момен ы — даже до 15—30 $см^3/м^3$, особенно если ветер дует от ацетиле овой станции. Такое содержание ацетилена в воздухе опасно для аботы воздухоразделительного аппарата.

Ацетилен переходит в твердое состояние при температуре -83,6 °С, поэтому, попадая вместе с воздухом в кислородный аппа ат, где температура значительно ниже, он затвердевает. Ацетилен пособен растворяться в жидкой азото-кислородной смеси, жидком ислороде и в жидком азоте. В 1 $дм^3$ жидкого кислорода раство яется около 5 $см^3$ ацетилена (в пересчете на газ), что соответст ует пределу насыщения раствора ацетилен — жидкий кислород.

Ацетилен $C_2H_2$ — ненасыщенный (непредельный) углеводород, пособный разлагаться со взрывом. Склонность ацетилена к взрыв атому самораспаду увеличивается с повышением его концентрации данном объеме (например, при повышении давления, переходе в идкое или твердое состояние). Взрывоопасность ацетилена в кис родсодержащей среде (жидкий воздух, жидкий кислород) увели ивается. Присутствие жидкого азота понижает взрывоопасность цетилена и сужает границы взрывчатого распада.

В смеси с жидким кислородом взрывоопасны все углеводороды, о наибольшую опасность представляет смесь ацетилен — жидкий ислород. Эта смесь взрывается при наименьшей величине началь ого импульса (механического удара, ударной газовой волны). Установлено также, что при содержании ацетилена в жидком кис ороде ниже предела его растворимости в кислороде система не рывоопасна. Взрыв может происходить при насыщении жидкого ислорода ацетиленом выше предела растворимости, при выделе ии ацетилена в виде суспензии или при высаживании его на стен ах сосуда в твердом виде.

Как показали исследования[7, 2] система ацетилен—жидкий кисло од становится наиболее чувствительной к удару в момент, когда ри испарении жидкого кислорода кристаллы твердого ацетилена ачинают выступать из жидкости и соприкасаться с газообразным ислородом. В этом случае энергия поджигания ацетилено-кисло одной смеси в $5 \cdot 10^8$ раз меньше, чем твердого ацетилена. Взры-

воопасность ацетилена повышается вследствие малой растворим сти его в жидком кислороде или жидком воздухе и сравнитель небольшой упругости паров.

Если содержание ацетилена превышает предел его растворим сти в жидком кислороде или воздухе, избыток твердого ацетиле находится в жидком кислороде в виде суспензии, т. е. очень мелк частиц, распределенных по всей высоте слоя кипящей жидкос При испарении жидкости твердый ацетилен превращается в бел хлопьевидный осадок и остается в соответствующих частях возд хоразделительного аппарата до момента их отогрева.

Ацетилен накапливается чаще всего в конденсаторе раздел тельного аппарата; жидкий кислород находится здесь в состоян кипения, постоянно испаряясь. При этом ацетилен практически по ностью остается в жидком кислороде вследствие очень малой упр гости его паров. Накопление и выделение твердого ацетилена м жет происходить также в испарителе нижней колонны, арматуре трубопроводах, особенно там, где быстро выпаривается жидкос содержащая ацетилен.

При кипении раствора ацетилен — кислород кристаллы ацети на постепенно откладываются на поверхности трубок конденсатор имеющих более высокую температуру, а также в местах, куда ж кий кислород поступает периодически и может там полностью паряться. Высадившиеся кристаллы периодически то покрывают тонким слоем жидкого кислорода, то выступают из него, т. е. соз ются условия, наиболее благоприятствующие для возникновен взрыва при наличии импульса (например, удара гидравлическ или газовой волны и др.).

Установлено, что кристаллы ацетилена высаживаются не тол на трубках, периодически омываемых жидким кислородом, но щелях между трубками и трубной решеткой, трещинах, зазор между кромками листов при плохой пайке и других местах, созданы благоприятные условия для выпаривания жидкости задержания частиц ацетилена.

Известны случаи взрывов вследствие накопления твердого ацетилена в воздушном дроссельном вентиле, трубопроводах пе адсорберами, а также на тарелках (особенно колпачковых) н ней и верхней колонн, где возможно выпаривание жидкости временных остановках аппарата на частичный отогрев. Взры чаще происходят в периоды пуска аппарата (например, после временной остановки), когда он уже несколько прогрет, а жидк мало и она интенсивно упаривается, что приводит к повыше концентрации ацетилена в растворе.

Образовавшийся твердый ацетилен снова почти не раствор в жидком кислороде или жидком воздухе; он может длител время находиться в аппарате в твердом виде до момента возни вения начального импульса взрыва, хотя анализы и показы отсутствие ацетилена в жидкости. Поэтому, например, ситч тарелки лучше колпачковых, так как на них жидкость при оста



е аппарата не остается и не выпаривается, а стекает через отвер стия тарелок вниз и может быть слита из конденсатора или испа рителя вместе с содержащимся в ней ацетиленом.

Возможность накопления в аппарате твердого ацетилена опре деляется количеством газообразного ацетилена в поступающем воз духе. При содержании в 1 $м^3$ воздуха менее 0,037 $см^3$ ацетилена последний (по опытам И. П. Ишкина) может находиться в жидком кислороде только в растворенном виде; при более высоком содер жании кристаллы ацетилена выделяются из раствора и накапли ваются в аппарате.

Сила взрыва определяется количеством твердого ацетилена. Присутствие масла (или продуктов его разложения) в месте взры а ацетилена способствует увеличению силы взрыва.

Непосредственная причина взрывчатого самораспада твердого цетилена (начальный импульс) еще не может считаться оконча ельно установленной. Предполагают, что взрыв происходит вслед твие трения и ударов твердого ацетилена о трубки конденсатора, т присутствия в жидком кислороде окислов азота и перекисных рганических соединений, присутствия жидкого озона и в резуль ате разряда статического электричества.

Можно предположить, что взрывчатый самораспад твердо о ацетилена происходит в момент сублимации его, т. е. перехода цетилена из твердого состояния непосредственно в газообразное.

Взрыв может произойти также от гидравлического удара и уда а газовой волны, например при быстром открытии вентиля, рез ом повышении давления, быстром вскипании жидкого кислорода ли воздуха. Ударный импульс — это наиболее вероятная причина зрывов ацетилена.

Опыты З. Б. Басырова показали, что ударной волной почти сегда удается вызвать взрыв смеси ацетилен — жидкий кислород, содержащей 5—6 вес. % ацетилена. При вымораживании ацетиле а на стенках сосуда, когда толщина слоя достигает 1,5—2 *мм*, ве ичина начального давления, необходимого для создания импульса возникновения взрыва, значительно уменьшается.

**Другие примеси.** Такие углеводороды, как метан, этан, этилен, достаточно хорошо растворяются в жидком кислороде и жидком воздухе и, следовательно, не накапливаются в аппаратах в твердом виде. Растворимость метана, например, в $1{,}5 \cdot 10^5$ раз больше, чем ацетилена. Поэтому метан менее опасен для воздухоразделительных установок, так как благодаря хорошей растворимости в жидком кислороде и высокой упругости паров метан выводится из аппара а вместе с жидкостью. То же можно сказать об этане и этилене.

Меньшей растворимостью, чем указанные выше углеводороды, обладают пропан, пропилен, бутан и бутилен, поэтому они представляют бо́льшую опасность в случае высокого содержания их в перерабатываемом воздухе. Наиболее опасен пропилен; по способности к взрыву он находится на втором месте после ацетилена.

Пропан хорошо растворяется в жидком $O_2$, однако его приме взрывоопасна. Температура плавления пропана равна 84 °К, проп лена 88 °К, т. е. ниже температуры кипения жидкого кислоро Поэтому при концентрациях, превышающих пределы раствори сти, эти углеводороды находятся в жидком кислороде в виде капель, плавающих на поверхности и способных коагулировать, может создавать условия, способствующие возникновению взры

Представляет опасность также накопление в аппарате сероуг рода, который в смеси с жидким кислородом по чувствительно к ударному импульсу взрыва близок к ацетилену и пропилену.

Взрывоопасны смеси смазочного масла и его погонов с жид кислородом, хотя по отношению к ударному импульсу взрыва чувствительность в несколько раз ниже, чем у ацетилена. Он ность масла и его погонов состоит в том, что они могут накап ваться в аппарате в значительных количествах и усиливать с взрыва. Взрыв масла может также возникать в результате пер ного микровзрыва углеводородов в жидком кислороде.

## 14.3. СПОСОБЫ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ АЦЕТИЛЕНА

Известно несколько способов защиты воздухоразделитель аппаратов от накопления в них ацетилена. Наиболее распростр способ, основанный на адсорбции ацетилена силикагелем из творов ацетилен — жидкий воздух и ацетилен — жидкий кисл (авторы И. П. Ишкин и П. З. Бурбо).

**Адсорбция ацетилена силикагелем из кубовой жидкости.** ( ность этого метода заключается в том, что жидкий обогащен воздух (кубовая жидкость) пропускается через силикагель м КСК и КСМ, загруженный в адсорберы (конструкция адсорб описана в гл. 8). Полная очистка воздуха достигается при со жании в нем ацетилена не более 0,25 $см^3/м^3$. Ацетиленоемкост ликагеля указанных марок примерно одинакова и состав 2,2 $см^3$ на 1 $дм^3$ адсорбента (при содержании ацетилена в воз не выше 0,1 $см^3/м^3$). Силикагель КСМ более прочен, чем си гель КСК, поэтому он и применяется в ацетиленовых адсорб Эффективность силикагеля как адсорбента сильно зависит от стояния его поверхности и может значительно уменьшаться загрязнении твердой двуокисью углерода, а также присутствия ганических примесей (масла и его погонов) в очищаемой жидко

Для обеспечения надежной очистки воздуха от ацетилена обходимо: тщательно проверять состояние силикагеля и соотв вие его установленным требованиям; соблюдать указания инст ции по подготовке адсорбера к работе, порядок его включения ключения и переключения; не допускать превышения установ ной продолжительности работы адсорберов до очередного пере чения; соблюдать режим отогрева и регенерации адсорбента стематически контролировать содержание ацетилена до и посл



сорбера; хорошо очищать воздух от масла и двуокиси углерода перед адсорбером.

Недостатком этого способа является то, что адсорбер, установленный на потоке кубовой жидкости, предохраняет только верхнюю колонну и конденсатор, а нижняя колонна и испаритель не защищены от выделения в них ацетилена из раствора; это в ряде случаев приводило к взрывам в указанных частях аппарата. Адсорбер, в котором собирается ацетилен, расположен в блоке разделения и при определенных условиях (высокой концентрации ацетилена, неправильной эксплуатации и пр.) сам подвержен опасности взрыва, что и имело место на практике. Другим недостатком этого способа является возможность проскока ацетилена при слишком высокой концентрации его в воздухе или плохом качестве адсорбента. Тем не менее данный способ является достаточно простым и широко применяется в практике. Практически установлено, что адсорберы на линии кубовой жидкости обеспечивают поглощение 90—95% ацетилена, содержащегося в перерабатываемом воздухе, а также 50—60% других углеводородов с четырьмя и более атомами углерода.

Адсорбция ацетилена силикагелем в жидкой фазе применяется также в циркуляционном контуре очистки жидкого кислорода. При этом жидкий кислород отбирается из конденсатора, направляется в адсорбер (обычно ставят два переключаемых адсорбера) и после очистки от углеводородов вновь возвращается в конденсатор с помощью насоса или парлифта. Эффективность очистки повышается с уменьшением количества жидкости, выводимой из конденсатора.

**Адсорбция ацетилена силикагелем из воздуха в газовой фазе при низких температурах.** Способ был разработан и испытан в 1938 г. К. А. Лобашовым и Е. М. Спектор применительно к установкам высокого давления. Очистка от ацетилена проводилась при минус 119—минус 126 °С и давлении 52—70 $кгс/см^2$. В последующем способ очистки в газовой фазе нашел применение (при более низких давлениях и соответствующих им температурах) в газовых силикагелевых адсорберах. Его применяют также в установках низкого давления для очистки прямого и петлевого потоков воздуха после регенераторов. Преимуществом данного способа по сравнению с адсорбцией ацетилена из жидкого воздуха (на потоке кубовой жидкости) является то, что в данном случае весь воздух очищается от ацетилена и обеспечивается защита всех основных аппаратов блока разделения. Размеры адсорберов установок различных типов даны в гл. 8.

**Очистка воздуха от ацетилена цеолитами.** Способ применяется в установках с комплексной очисткой и осушкой воздуха цеолитами при положительных температурах от 5 до 8 °С. Цеолиты хорошо улавливают ацетилен и другие углеводороды из перерабатываемого воздуха (см. гл. 7).

**Каталитическая очистка воздуха от ацетилена.** В связи с отмеченными выше недостатками способа очистки воздуха от ацетиле-

на адсорбцией силикагелем в жидкой фазе разработаны другие м методы очистки. Одним из них является каталитическая очистка во духа от ацетилена и других углеводородов при положительны температурах.

Сущность способа (предложен проф. В. А. Ройтером) состои в каталитическом окислении содержащегося в сжатом воздухе ацетилена и других углеводородов при 170—180 °С. Катализатором служит марганцовая руда с нанесенным на нее серебром (0,8% массы катализатора). Воздух из компрессора *1* (рис. 14.2) под избыточным давлением 200—220 *кгс/см*² проходит блок осушки *3* поступает в межтрубное пространство теплообменника аппарат каталитической очистки, где нагревается теплом воздуха, выходящего из аппарата.

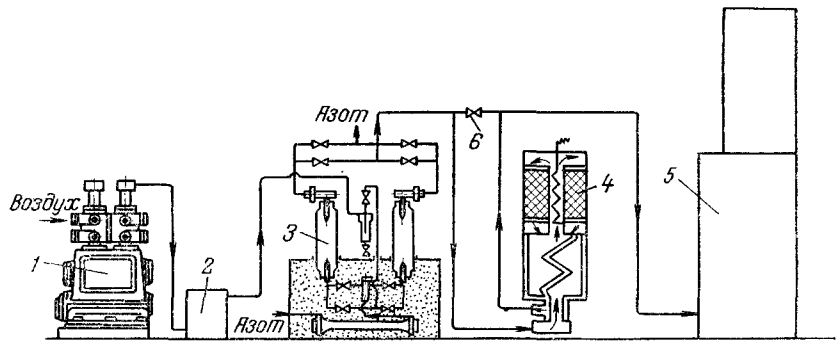



Рис. 14.2. Схема каталитической очистки воздуха от ацетилена:

*1* — воздушный компрессор; *2* — концевой холодильник; *3* — блок адсорбционной осуш *4* — аппарат каталитической очистки; *5* — блок разделения воздуха; *6* — обводной вент

После теплообменника воздух поступает в трубчатый электрод догреватель, нагревается до температуры 170—180 °С и проходи через катализатор, где ацетилен и другие углеводороды полности окисляются. Очищенный воздух поступает в трубное пространст теплообменника аппарата каталитической очистки, охлаждает поступающим в него воздухом и затем направляется в теплообм ник блока разделения воздуха *5*.

Теплообменник *7* аппарата очистки (рис. 14.3) — поперечнов той из медных труб 10×1 *мм;* наружный диаметр намотки 320 *м* высота намотки 1730 *мм*. Высота слоя катализатора 1300 *мм*, объ 115 *дм*³. Мощность электроподогревателя 20,4 *квт*. Вес аппарат изоляцией 4500 *кгс*.

Способ каталитической очистки длительно проверялся на скольких действующих установках и оказался вполне надеж взрывобезопасность воздухоразделительного аппарата с каталит ческой очисткой обеспечивается даже при высоком содержан ацетилена в воздухе (до 10 *см*³/*м*³). Целесообразно производ очистку таким методом в установках высокого и среднего давлен



работающих без детандера, так как не исключается возможность загрязнения воздуха маслом, применяемым для смазки цилиндра детандера. Это ограничение отпадает, если в установке используется детандер без масляной смазки цилиндра. Аппаратура каталитической очистки имеет сравнительно большие размеры и вес; она разработана для установок производительностью до 300 *м*³/*ч* кислорода включительно; для более крупных установок эта аппаратура громоздка.

Проводится опробование данного способа также на установках низкого давления. Наиболее вероятные области применения способа каталитической очистки воздуха от углеводородов — это мелкие и средние установки, работающие в районах с высокой загрязненностью воздуха взрывоопасными примесями.

Применительно к установкам низкого давления с регенераторами следует учитывать, что воздух частично очищается от $C_2H_2$ вследствие вымораживания ацетилена на насадке, а также адсорбции его кристаллами твердой двуокиси углерода. Например, алюминиевая насадка удерживает до 40% ацетилена, каменная насыпная — до 80—90%. Другие непредельные уг-

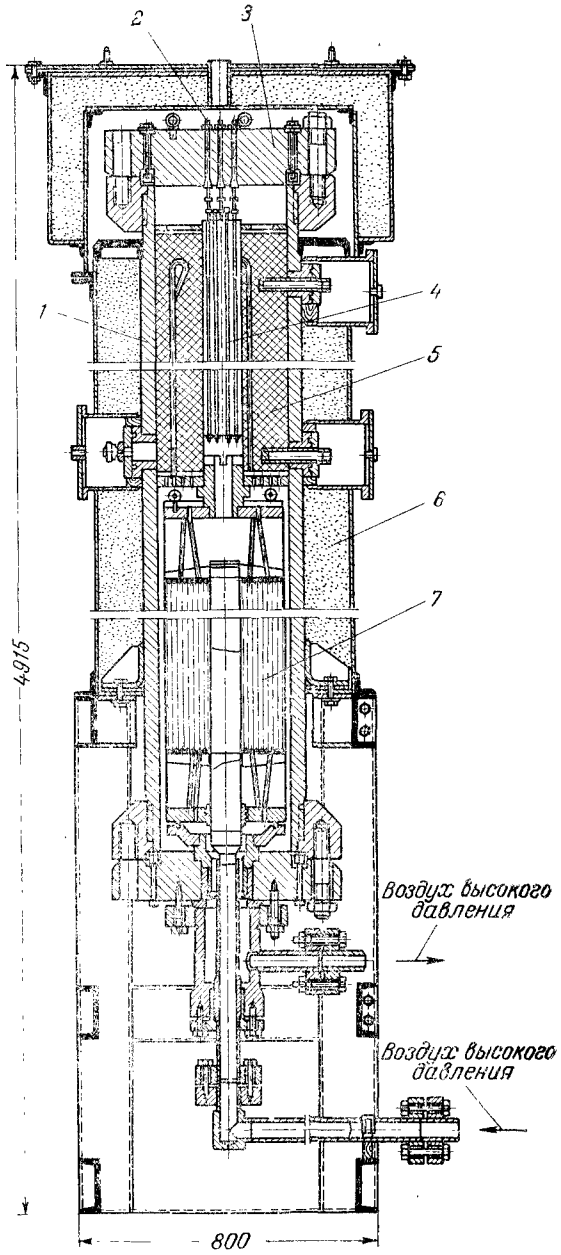



Рис. 14.3. Аппарат каталитической очистки воздуха на 1800 *м*³/*ч* воздуха:

*1* — корпус; *2* — подвод электрического тока; *3* — крышка; *4* — электроподогреватель; *5* — катализатор; *6* — тепловая изоляция; *7* — теплообменник.

леводороды, а также предельные удерживаются в меньшей степени: до 20% на алюминиевой насадке и до 40% на каменной*.

При этом имеется опасность уноса углеводородов с насадки регенераторов в воздухоразделительный аппарат (где они могут накапливаться) прямым потоком воздуха при нарушении температурного режима работы регенераторов и отепление насадки. Существует также опасность смыва углеводородов с переохлажденной насадки при конденсации воздуха в регенераторах. Поэтому поддержанию постоянства теплового режима регенераторов должно уделяться самое серьезное внимание (см. разд. 14.4).

## 14.4. ОСНОВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАЩИТЕ УСТАНОВОК ОТ ВЗРЫВА

**Общие указания и контроль.** Для предупреждения взрывов в воздухоразделительных аппаратах вследствие накопления в них взрывоопасных примесей руководствуются следующими основными положениями **.

Забор воздуха необходимо производить там, где содержание вредных примесей при любом направлении ветра не превышает пределов, указанных в табл. 4.1. Содержание вредных примесей в воздухе в месте его забора определяют в случаях, когда выбросы примесей находятся ближе 2 *км* от места забора.

Блоки разделения воздуха должны быть оснащены жидкостными адсорберами для ацетилена, установленными на потоке кубовой жидкости между колоннами высокого и низкого давления. Эксплуатация блоков без адсорберов запрещается. Жидкостные адсорберы можно не устанавливать только в блоках установок, работающих при комплексной очистке и осушке всего потока воздуха цеолитами, а также в блоках с низкотемпературными газовыми адсорберами на всем потоке перерабатываемого воздуха.

Удаление из аппаратов взрывоопасных примесей должно обеспечиваться проточностью всех конденсаторов-испарителей, в которых происходит испарение жидкого кислорода и обогащенной кислородом жидкости. Жидкость следует отводить в таком количестве, чтобы исключить возможность накопления примесей в аппарате до взрывоопасных концентраций.

В тех случаях, когда количество выводимой жидкости из прямотрубных конденсаторов менее 20% испаряемого в них жидкого кислорода, целесообразно использовать циркуляционную адсорбционную очистку жидкого кислорода. Для обеспечения циркуляции жидкости применяется парлифт.

При пуске блока разделения воздуха после отогрева процесс должен вестись так, чтобы вся накапливаемая в аппарате жидкость сначала поступала в сборник нижней колонны, а в верхнюю колонну жидкость подавалась бы только через адсорбер*. Первые порции жидкости (не менее 5 *см*, по указателю уровня) из куба нижней колонны, конденсаторов, сборников жидкости верхних колонн, конденсаторов аргонных и криптоновых колонн должны сливаться.

В установках двух давлений запрещается многократный (более 2 раз) перевод блока разделения на режим накопления жидкости. Если при подаче воздуха низкого давления уровень жидкости в конденсаторе падает ниже допустимого, и это происходит также при повторном накоплении жидкости — блок разделения должен быть остановлен для выявления и устранения причин неудовлетворительной работы.

Особое внимание должно быть уделено организации систематического контроля за содержанием взрывоопасных примесей в технологических потоках блока разделения. Периодичность анализов указана в табл. 14.1.

В период пуска блока разделения после его отогрева отбор проб кубовой жидкости и жидкого кислорода из всех потоков, указанных в табл. 14.1, для первого анализа производится после вторичного накопления жидкости до $^1/_4$ нормального уровня, но не позднее, чем через 3 *ч* после окончания слива жидкости. В последующем, до момента накопления заданного уровня жидкости, анализы производят: на установках высокого, среднего и двух давлений — через каждые 4 *ч*, а на установках низкого давления — через каждые 2 *ч*. После накопления уровня жидкости до заданного периодичность отбора проб должна быть согласно табл. 14.1. Определение содержания ацетилена в кубовой жидкости и жидком кислороде не производят только на установках, работающих с цеолитовыми блоками комплексной очистки воздуха.

В период подготовки адсорберов к переключению, вызванному появлением ацетилена в жидком кислороде, определение содержания $C_2H_2$ производят через каждые 2 *ч*.

При обнаружении в анализируемых потоках взрывоопасных примесей следует руководствоваться указаниями, данными в табл. 14.2.

Запрещается эксплуатация блоков разделения воздуха, если содержание ацетилена:

в кубовой жидкости равно или более 0,4 $см^3/дм^3$ для установок высокого и среднего давления и 0,25 $см^3/дм^3$ для установок низкого давления;

---

* С. С. Петухов, сб. Взрывобезопасность воздухоразделительных установок, ЦИНТИхимнефтемаш, 1969.

** ВНИИкриогенмаш. Основные положения по защите от взрывов стационарных установок, Руководящий технический материал РТМ 26-04-11—68, составитель Файнштейн В. И., 2-е изд., 1968.

* Для установок с блоками комплексной цеолитовой очисткой воздуха или низкотемпературными газовыми адсорберами на всем потоке воздуха этого не требуется.

Таблица 14.1. **Периодичность анализов для определения взрывоопасных примесей**

| Установки | Определяемое вещество | Анализируемые потоки | Периодичность, *ч* |
|---|---|---|---|
| Высокого, среднего и двух давлений | Ацетилен | Жидкость из куба нижней колонны | 8* |
| | | Жидкий кислород из основных конденсаторов | 8* |
| | Сероуглерод | Эти же потоки, если при анализе на ацетилен наблюдается окрашивание поглотительного раствора в желтый цвет | — |
| | Предельные и непредельные углеводороды, определяемые индивидуально | Жидкий $O_2$ из основного конденсатора установки Г-6800 | 4 |
| | | Первичный криптоновый концентрат после испарителя | 4 |
| | Сумма углеводородов | Первичный криптоновый концентрат после испарителя** | 4 |
| | Масло | Жидкость из куба нижней колонны | 24 |
| | | Жидкий кислород из основного конденсатора | 24 |
| Низкого давления | Ацетилен | Жидкость из куба нижней колонны | 4 |
| | | Жидкий $O_2$ из трубопровода перед адсорбером | 4*** |
| | | Жидкий $O_2$ из сборника верхней колонны при работе с отключенным адсорбером на потоке жидкого кислорода | 2 |
| | | Жидкий $O_2$ из выносного конденсатора | 4 |
| | | Жидкий $O_2$ из трубопровода после адсорбера при обнаружении ацетилена в жидком $O_2$ перед адсорбером в количестве более 0,04 $см^3/дм^3$ | 4 |
| | | Жидкость из верхних конденсаторов криптоновых колонн | 8 |
| | | Жидкость из конденсаторов колонн технического кислорода и чистого азота | 8 |
| | Сероуглерод | Те же потоки, если при анализе на ацетилен обнаруживается желтое окрашивание поглотительного раствора | — |
| | Предельные и непредельные углеводороды, определяемые индивидуально | Жидкий кислород из прямотрубных конденсаторов, последних на потоке жидкого $O_2$ | 4 |

* Если уровень жидкости в конденсаторе менее 1/2 расстояния между решетками, анализы проводятся через 4 *ч*.

** Сумму углеводородов определяют, если анализы на индивидуальные углеводороды не производятся.

*** При работе с отключенным адсорбером—через 2 *ч*.

*Продолжение*

| Установки | Определяемое вещество | Анализируемые потоки | Периодичность, *ч* |
|---|---|---|---|
| Низкого давления | Предельные и непредельные углеводороды, определяемые индивидуально | Первичный криптоновый концентрат после испарителя при любом режиме работы дополнительного блока | 4 |
| | Сумма углеводородов | Первичный криптоновый концентрат после испарителя при любом режиме работы дополнительного блока* | 4 |
| | Масло | Воздух перед блоками разделения при наличии фильтров, смазываемых маслом | 168 (1 раз в неделю) |

* Сумму углеводородов определяют, если анализы на индивидуальные углеводороды не производятся.

в жидком кислороде из основного конденсатора и из коммуникаций конденсаторов (для установок низкого давления) или в жидком кислороде из выносных конденсаторов более 0,2 $см^3/дм^3$;

в жидком кислороде из конденсаторов установок низкого давления (при уровне жидкого кислорода ниже предусмотренного инструкцией для нормального режима) равно или более 0,04 $см^3/дм^3$;

в криптоновом концентрате равно или больше 0,4 $см^3/дм^3$.

Запрещается так же эксплуатация блоков разделения воздуха если концентрация сероуглерода в жидком кислороде или криптоновом концентрате более 0,12 $мг/дм^3$ и при содержании индивидуальных углеводородов в жидком кислороде из конденсаторов, последних по ходу жидкого кислорода, и в криптоновом концентрате выше значений, приведенных в табл. 14.3.

Наряду с количественным определением содержания масла на установках с поршневыми компрессорами каждую смену определяют органолептически (по запаху) присутствие масла и его погонов в жидком кислороде из основного конденсатора. Для этого в колбу наливают 1 $дм^3$ кубовой жидкости и после испарения убеждаются в отсутствии запаха масла. Стойкий запах масла в кубовой жидкости указывает на отравление адсорбента в блоке осушки, а наличие запаха в жидком кислороде — на отравление адсорбента в жидкостном адсорбере.

В жидком кислороде (продукте) содержание ацетилена и масла должно соответствовать нормам ГОСТ 6331—68 (см. гл. 1.5). При содержании примесей свыше этих норм жидкость из цистерны пропускают через адсорбер для очистки или испаряют, используя кислород в виде газа.

**Режим работы конденсаторов.** Установки КГ-300М, КГ-300-2Д, КТ-1000, КТ-1000М, ГЖА-2000 и Г-6800 без выносных конденсато-

**Таблица 14.2. Предельные содержания взрывоопасных примесей в технологических потоках и принимаемые меры в случае их превышения**

| № по порядку | Анализируемые потоки | Определяемое вещество | Предельные содержания взрывоопасных веществ, *см³/дм³* жидкости | Принимаемые меры |
|---|---|---|---|---|
| | **Пуск блока разделения воздуха** | | | |
| 1 | Жидкость из куба нижней колонны | Ацетилен | <0,2 | Продолжать накопление жидкости |
| | | | ≥0,2 | Прекратить подачу жидкости в адсорбер. Слить жидкость из куба нижней колонны. Вновь накопленную жидкость можно подавать в другие аппараты только после получения результатов следующего анализа |
| 2 | Жидкий кислород из всех потоков, указанных в табл. 14.1 | Ацетилен | <0,04 | Продолжать накопление жидкости |
| | | | ≥0,04 | Жидкость слить. Прекратить подачу жидкости в последующие аппараты. Обеспечить пуск регенерации работоспособность адсорбера перед аппаратом, откуда взята проба жидкости |
| | **Нормальная работа блока разделения воздуха** | | | |
| 1 | Жидкость из куба нижней колонны в установках высокого, среднего и двух давлений | Ацетилен | <0,2 | Нормальная работа |
| | | | 0,2—0,4 | Выяснить причину поступления в блок повышенного количества ацетилена. Отбор проб проводить через каждые 2 *ч* |
| | | | ≥0,4 | Остановить блок на полный отогрев |
| 1а | То же в установках низкого давления | Ацетилен | <0,15 | Нормальная работа |
| | | | 0,15—0,25 | Выяснить причину поступления в блок повышенного количества ацетилена. Отбор проб производить через каждые 2 *ч* |
| | | | ≥0,25 | Остановить блок на полный отогрев |



*Продолжение*

| № по порядку | Анализируемые потоки | Определяемое вещество | Предельные содержания взрывоопасных веществ, *см³/дм³* жидкости | Принимаемые меры |
|---|---|---|---|---|
| 2 | Жидкий кислород из основных конденсаторов или их коммуникаций в установках низкого давления | Ацетилен | <0,04 | Нормальная работа |
| | | | 0,04—0,2 | Переключить адсорберы на потоке кубовой жидкости. Через 2 *ч* взять пробу на анализ и при наличии в ней ацетилена отобрать еще одну пробу. Если в третьей пробе содержание ацетилена не уменьшилось, или его содержание во второй пробе больше, чем в первой, остановить блок на полный отогрев |
| | | | ≥0,2 | Остановить блок на полный отогрев |
| 2а | Жидкий кислород из основных конденсаторов установок высокого, среднего и двух давлений при наличии одного адсорбера на потоке кубовой жидкости | Ацетилен | 0,04—0,2 | Отобрать последовательно (через 2 *ч*) две контрольные пробы. При наличии в них такой же концентрации ацетилена остановить аппарат, слить жидкость из конденсатора и адсорбера и отрегенерировать адсорбент в адсорбере. Если после включения аппарата с регенерированным адсорбентом и в последующих двух пробах, отобранных через 2 *ч*, содержание ацетилена не уменьшилось, то остановить аппарат на отогрев и заменить адсорбент в адсорбере |
| | | | ≥0,2 | Остановить аппарат на отогрев |
| 3 | Жидкий кислород из центральной трубы выносного конденсатора (в установках низкого давления с одним адсорбером перед выносным конденсатором) | Ацетилен | ≥0,04 | Сделать последовательно (через 2 *ч*) два анализа. Если содержание ацетилена не уменьшается, выносной конденсатор поставить на отогрев, а адсорбер перед ним на регенерацию |
| | | | ≥0,2 | Конденсатор поставить на отогрев, а адсорбер перед ним на регенерацию |

| № по порядку | Анализируемые потоки | Определяемое вещество | Предельные содержания взрывоопасных веществ, *см³/дм³* жидкости | Принимаемые меры |
|---|---|---|---|---|
| 3а | Жидкий кислород из центральной трубы конденсатора, оснащенного системой циркуляционной адсорбционной очистки жидкого $O_2$ | Ацетилен | ≥0,04 | Сделать последовательно два анализа. Если содержание ацетилена не уменьшилось, поставить циркуляционный адсорбер на регенерацию. При наличии одного адсорбера конденсатор на время регенерации выключается |
| | | | ≥0,2 | Конденсатор поставить на отогрев, а адсорбер на регенерацию |
| 4 | Жидкость из верхних конденсаторов криптоновых колонн, колонны технического кислорода | Ацетилен | <0,04 | Нормальная работа |
| | | | 0,04—0,2 | Сделать повторный анализ. Если содержание ацетилена не уменьшается, переключить адсорбер на потоке жидкости, поступающей в конденсатор |
| | | | ≥0,2 | Отключить соответствующий аппарат на отогрев |
| 5 | Первичный криптоновый концентрат | Ацетилен | <0,1 | Нормальная работа |
| | | | 0,1—0,4 | Увеличить отбор криптонового концентрата |
| | | | ≥0,4 | Остановить криптоновую колонну на полный отогрев. Поставить на отогрев адсорбер на потоке жидкого кислорода |
| 6 | Технологические потоки, указанные в пп. 2, 3, 4 и 5 | Сероуглерод | 0,06—0,12* | Увеличить слив жидкости из соответствующего конденсатора. Определение сероуглерода производить не реже чем каждые 2 *ч* |
| | | | ≥0,12* | Отключить соответствующую колонну на полный отогрев |
| 7 | Жидкий кислород из прямотрубных конденсаторов с внутритрубным кипением, последних по ходу жидкого $O_2$, а также первичный криптоновый концентрат | Предельные и непредельные углеводороды, определяемые индивидуально (кроме ацетилена) | Менее $^1/_2$ нормы по табл. 14.3 | Нормальная работа |
| | | | От $^1/_2$ до нормы по табл. 14.3 | Увеличить слив жидкости из соответствующего конденсатора |
| | | | Более нормы по табл. 14.3 | Остановить соответствующий аппарат на отогрев |

* В *мг/дм³* жидкости.





| № по порядку | Анализируемые потоки | Определяемое вещество | Предельные содержания взрывоопасных веществ, *см³/дм³* жидкости | Принимаемые меры |
|---|---|---|---|---|
| 7а | Жидкий кислород из центральной трубы конденсаторов, оснащенных системой циркуляционной адсорбционной очистки жидкого кислорода | Предельные и непредельные углеводороды, определяемые индивидуально (кроме ацетилена) | Менее $^1/_2$ нормы по табл. 14.3 | Нормальная работа |
| | | | От $^1/_2$ до нормы по табл. 14.3 | Увеличить слив жидкости из конденсатора. Адсорбер поставить на регенерацию. При наличии одного адсорбера выключить конденсатор на время регенерации адсорбента |
| | | | Более нормы по табл. 14.3 | Поставить конденсатор на отогрев, адсорбер на регенерацию |
| 8 | Криптоновый концентрат | Сумма углеводородов | <2000** | Нормальная работа |
| | | | 2000—2200** | Увеличить отбор криптонового концентрата |
| | | | ≥2200** | Остановить криптоновую колонну на отогрев |
| 9 | Жидкий кислород из основных конденсаторов установок высокого, среднего и двух давлений | Масло | 0,1—0,2* | Выяснить источники поступления масла |
| | | | 0,2—0,4* | Анализы производить не реже чем через 8 *ч*. Если в пяти последовательных анализах содержание масла будет более 0,4 *мг/дм³*, аппарат отогреть и обезжирить |
| 10 | Воздух перед блоком разделения в установках низкого давления, оснащенных воздушными фильтрами, смазываемыми маслом | Масло | 0,005—0,05*** | Принять меры по уменьшению уноса масла из фильтра. При невозможности уменьшения содержания масла в воздухе остановить фильтр и обезжирить его. Анализы проводить через 8 *ч* |
| | | | 0,05*** | Остановить фильтр и обезжирить его |

* В *мг/дм³* жидкости
** В миллиграммах углерода на 5 *дм³* жидкости.
*** В миллиграммах на *м³* воздуха.

Таблица 14.3. **Предельные содержания взрывоопасных примесей в жидком кислороде**

| Вещества | Предельные содержания | |
|---|---|---|
| | *см³/дм³* жидкости | В миллиграммах углерода на 1 *дм³* жидкости |
| Ацетилен | 0,2 | 0,22 |
| Высшие ацетиленовые углеводороды в сумме, не более | 0,1 в пересчете на метилацетилен | 0,15 |
| Предельные и непредельные углеводороды малой растворимости в жидком кислороде ($C_5$—$C_6$) в сумме, не более | 0,3 в пересчете на *н*-гексан | 1,0 |
| Предельные и непредельные углеводороды средней растворимости в жидком кислороде (пропилен, изобутан, бутен-1, *н*-бутан, изобутилен) в сумме, не более | 5,0 в пересчете на изобутилен | 11,0 |
| Предельные и непредельные углеводороды, хорошо растворимые в жидком кислороде (метан, этан, этилен и пропан в сумме, не более | 800 в пересчете на метан | 430 |
| Сероуглер)од | 0,04 | 0,12* |
| Масло | — | 0,4* |

* В *мг/дм³*.

ров витого типа эксплуатировать запрещается. Эти установки должны быть реконструированы и снабжены такими конденсаторами.

Выносные конденсаторы можно отключать для отогрева только в том случае, если в течение 3 суток перед этим ацетилен в жидком кислороде из основных конденсаторов отсутствовал. После отключения выносного конденсатора анализы жидкого кислорода на ацетилен производятся через каждые 4 *ч*. Кроме того, должен производиться слив жидкости согласно технологической инструкции.

Выносные витые конденсаторы установок, не работающие на получение криптона, в случае отсутствия непрерывного слива из них продукта в отделитель жидкости (при так называемом сухом режиме), должны регулярно 1 раз в смену промываться жидким кислородом. После промывки жидкий кислород из отделителя жидкости должен немедленно удаляться.

Запрещается эксплуатация выносных витых конденсаторов при уменьшении их нагрузки по кислороду (вследствие засорения трубок или неудовлетворительной работы распределителей жидкости) до 25% от нормальной, предусмотренной паспортом и установленной при испытаниях. В этих случаях выносной конденсатор отключают, отогревают, продувают или ремонтируют.

В блоках разделения низкого давления должна обеспечиваться проточность всех аппаратов, где происходит кипение жидкого кислорода и обогащенной кислородом жидкости.



В конденсаторах с межтрубным кипением жидкости уровень жидкости при нормальном режиме должен быть не менее $^1/_4$ расстояния между трубными решетками, а в установках КГ-300М и КГ-300-2Д не менее $^1/_2$ этого расстояния.

В длиннотрубных конденсаторах с внутритрубным кипением кислорода минимально допустимые уровни жидкого кислорода устанавливают применительно к каждому типу конденсатора, исходя из необходимости обеспечить их работу в режиме кипения с циркуляцией*.

**Режим работы регенераторов.** Недопустимо попадание жидкого кислорода или жидкого воздуха в газовые полости клапанных коробок кислородных регенераторов, что должно контролироваться каждую смену продувкой клапанных коробок через соответствующие продувочные вентили. Выносные конденсаторы должны иметь эффективные устройства, сепарирующие жидкость.

Запрещается превышать установленные предельные уровни жидкого кислорода в сборниках для предупреждения возможного уноса жидкости с паром.

Следует строго поддерживать установленный инструкцией тепловой режим работы регенераторов, так как их «отепление» приводит к уносу взрывоопасных примесей (накопившихся в регенераторах) в блок разделения. Переохлаждение же насадки регенераторов приводит к конденсации и накоплению в нижней части регенераторов и в клапанной коробке ожиженного воздуха, обогащенного взрывоопасными примесями.

Для обеспечения безопасной работы блока разделения воздуха целесообразно оснастить регенераторы устройством для автоматического поддержания в них заданного теплового режима.

Продувку регенераторов сверху вниз для уменьшения их сопротивления можно производить только во время остановки блока разделения и при обязательном выбросе в атмосферу всего продувочного воздуха.

**Слив, испарение жидкости и работа дренажных коллекторов.** Сливаемую из отделителей (после витых конденсаторов) жидкость и жидкий кислород из основных конденсаторов (в том числе и для обеспечения их проточности) следует испарять в специальных испарителях (типа испарителей криптонового концентрата), располагаемых возможно ближе к блоку разделения воздуха; эти испарители должны работать при температуре воды в ванне не менее +80 °С.

Испарение жидкости, сливаемой из отдельных аппаратов перед их отогревом, следует производить в специальных испарителях быстрого слива. Ввод жидкости в такой испаритель производится непосредственно в зону, обогреваемую паром. Сливать жидкий кислород на землю или асфальт запрещается.

* Указания по определению минимально допустимого уровня жидкого кислорода см. «Руководящие указания по проведению работ на длиннотрубных конденсаторах-испарителях с целью определения наличия режима кипения с циркуляцией», ВНИИкриогенмаш, 1967.

Нельзя допускать работу блоков разделения при пропусках жидкости в сливных и продувных вентилях. Дренажные коллекторы, по которым жидкий кислород поступает в испаритель при сливе, следует отогревать не реже 1 раза в 7 суток до положительных температур.

**Жидкостные адсорберы.** Для использования в жидкостных адсорберах, как уже указывалось выше, применяется силикагель КСМ (ГОСТ 3956—54*) после лабораторной проверки его влажности и насыпной массы, а также удаления пыли и мелких частиц просеиванием через сито с размером отверстий 2,5—3 *мм*. Непосредственно перед загрузкой в адсорбер силикагель сушат при 180—220 °С до постоянного веса или подвергают высокотемпературной регенерации в адсорбере при температуре газа на входе в адсорбер 220—240 °С. Регенерацию заканчивают спустя 2—3 *ч* после достижения температуры газа на выходе, равной 180—200 °С. Температура силикагеля при сушке не должна превышать 250 °С. Режим сушки и регенерации должен строго контролироваться.

После сушки силикагель сразу же загружают в адсорбер или хранят в герметической таре, исключающей его соприкосновение с атмосферным воздухом. Необходимая плотность слоя силикагеля в адсорбере достигается обстукиванием или с помощью нажимного устройства. Во время засыпки и после нее вентили на адсорбере должны быть закрыты во избежание попадания влаги в адсорбент. Образец силикагеля необходимо сохранять до полной отработки загруженного адсорбента. В установках высокого, среднего и двух давлений силикагель заменяют не реже 1 раза в год при одном адсорбере и 1 раза в 2 года при двух адсорберах (в последнем случае 1 раз в год адсорбент просеивают); в установках КГ-300-2Д, КГ-300М, КТ-1000, КТ-1000М, ГЖА-2000; Г-6800 и в установках жидкого кислорода — 1 раз в год. В установках низкого давления и установке КТ-3600 1 раз в 2 года производят просеивание и досыпку адсорбента и 1 раз в 6 лет замену адсорбента. При обнаружении систематических проскоков ацетилена в конденсаторы адсорбент подлежит замене независимо от срока его работы.

При пуске установки адсорберы включают только после накопления жидкости в кубе колонны. Охлаждают адсорберы, как правило, жидкостью. Переключение адсорберов на потоке кубовой жидкости производят при появлении ацетилена на выходе этих аппаратов или по истечении установленного инструкцией срока непрерывной работы адсорбера. Для адсорберов, установленных на линии кубовой жидкости, длительность непрерывной работы адсорбера не должна превышать 10 суток; для адсорберов на линии жидкого кислорода (включая и циркуляционные) — 30 суток. Адсорберы переключают также при возрастании их сопротивления более 1 *кгс/см*² на потоке кубовой жидкости и более 0,2 *кгс/см*² на потоке жидкого кислорода.

Перед разборкой для ревизии и ремонта адсорберы отогревают так, чтобы температура газа на выходе адсорбера была не ниже



+30 °С. Непосредственно перед вскрытием адсорбер продувают азотом или воздухом, не содержащим масла.

Вынимать изоляцию адсорбера и фильтров можно только после полного отогрева этих аппаратов и прилегающей к ним изоляции. Категорически запрещается применять при отогреве аппаратов открытое пламя.

При любых остановках блока разделения воздуха из адсорбера сливают жидкость и подвергают его непрерывной продувке сухим азотом или регенерации. Это предотвращает образование в адсорбере взрывоопасной смеси десорбированных углеводородов с воздухом, обогащенным кислородом. При плановых остановках продолжительностью не более 2—5 *ч* жидкость из адсорбера можно не сливать, оставляя перед остановкой закрытыми вентили на линии подачи жидкости в адсорбер и открытыми — вентили после адсорбера.

Регенерацию адсорбента производят следующим образом. Жидкость сливают из адсорбера сразу же после его отключения и начинают его регенерацию сухим азотом или не содержащим масла воздухом, подавая эти газы в направлении, обратном потоку очищаемой жидкости. Сначала в адсорбер подают сухой газ при 20—25 °С в течение 2 *ч*, затем включают подогреватель и продолжают регенерацию при температуре газа на входе адсорбера не ниже 75 °С. Регенерацию заканчивают при температуре газа на выходе адсорбера не ниже 35—50 °С, поддерживаемой в течение 2 *ч*.

Периодически, не реже 1 раза в квартал, рекомендуется производить высокотемпературную регенерацию при 200 °С на входе, до постоянной температуры на выходе не ниже 120—150 °С и заданном расходе газа в течение 2 *ч*. Такая регенерация возможна, когда конструкция и адсорбер допускают нагрев до 220 °С. Если концентрация углеводородов систематически превышает нормы, указанные в табл. 14.2, то сроки между высокотемпературными регенерациями адсорбента должны быть сокращены. После регенерации адсорбер охлаждают газом до температуры на выходе не более 20—25 °С. Затем вентили на входе и выходе адсорбера должны быть плотно закрыты. Режим регенерации (ежечасный расход и температура греющего газа на входе и выходе, номера вентилей, через которые производят регенерацию) заносят в специальный журнал.

## 14.5. СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА МАСЛОМ

Как показали исследования*, причиной взрывов могут быть также масло и продукты его крекинга, образующиеся в воздушном компрессоре при высоких степенях сжатия, плохой работе холодильников, неправильной эксплуатации и т. д.

* Б. А. Иванов и др., Исследование взрывных параметров системы масло — кислород и масло — обогащенный кислородом воздух, Сб. «Криогенное, кислородное и автогенное машиностроение», № 3, ЦИНТИхимнефтемаш, 1969.

Продукты крекинга масла представляют собой легкокипящие углеводородные фракции с температурой кипения 60—150 °С и температурой застывания около —120 °С. Эти фракции образуются в последних ступенях компрессора, где избыточное давление сжатия превышает 70 *кгс/см*². Наиболее благоприятные условия для образования легких фракций возникают при повышении температуры сжатия до 145 °С и более. Исследования показали, что при смешивании указанных легких фракций с жидким кислородом они взрываются под влиянием различных импульсов (искры, детонации, пневматической ударной волны).

По степени взрывоопасности (в контакте с кислородом) масла можно разделить на две группы — легкие и тяжелые. Наиболее взрывоопасны легкие масла — индустриальное 12, ВМ-4, теллур, ИС-20. При тех же давлениях кислорода предельная взрывобезопасная толщина пленки тяжелых масел П-28, КС-19, МАС-35, Т гидрированное в 3—5 раз больше, чем у легких масел*.

При повышении температуры слой масла одной и той же толщины горит при более низком давлении кислорода, т. е. пределы горения масел расширяются. При повышении температуры с 20 до 150 °С и той же толщине пленки предельное давление, при котором масло горит в кислороде, уменьшается почти в 2 раза.

На величину предельного давления, при котором горение распространяется по слою масляной пленки, оказывает влияние скорость потока кислорода. При скорости потока от 1 до 10 *м/сек* предельное давление уменьшается в 5—10 раз по сравнению со статическими условиями. Опыты также показали возможность детонации масляных пленок в газообразном кислороде при действии слабого безударного инициатора взрыва и перехода медленного горения пленки масла в детонацию. С увеличением давления кислорода интенсивность горения пленки масла возрастает.

Пленка масла может поджечь и металл. Например, фольга из стали Х18Н9Т толщиной 0,1 *мм* при давлении кислорода 25 *кгс/см*² загорается при сгорании на ее поверхности пленки масла толщиной 40 *мкм*. Тяжелые масла менее чувствительны к воздействию ударной волны, чем легкие. Температура самовоспламенения масла в кислороде ниже, чем в воздухе. Глицерин и водно-глицериновая смесь в газообразном кислороде значительно менее взрывоопасны, чем минеральные масла.

Предельные толщины пленок, при которых начинается горение масла на поверхности металла в среде жидкого кислорода, составляют: для П-28 и ВМ-4—100 *мкм*, для индустриального — 12—75 *мкм*. При наличии пленки горючего вещества на поверхности металла в среде жидкого кислорода возможна детонация**.

Глицерин в жидком кислороде менее взрывоопасен чем масла.

* Б. А. Иванов, Н. А. Щепотьев, Труды ВНИИкриогенмаш, вып. 13, 1971.

** А. А. Борисов, Б. А. Иванов, Н. А. Щепотьев, В. П. Пустовалов, Кислородная промышленность, № 1 (1970).



Пары масел в смеси с газообразным кислородом взрывоопасны. Энергия поджигания паров масел в кислороде равна 0,3 *мдж*, что сравнимо с энергией поджигания горючих газовых смесей; ее величина уменьшается с повышением температуры и давления смеси*.

Для предотвращения загрязнения воздуха маслом применяются следующие способы.

**Смазка цилиндров компрессора наиболее термически стойкими маслами.** Такими маслами являются масло П-28 (ГОСТ 6480—53*), масло К-28 и масло брайтсток. Другие цилиндровые масла, а также регенерированные наиболее склонны к крекингу и образованию легких погонов, поэтому их применение при высоких температурах сжатия и высоких давлениях ограничивается или не допускается (см. гл. 5).

**Тщательное регулирование расхода масла и снижение его подачи до минимальных норм.** Минимальное количество смазки:

для цилиндров $$Q_ц = \alpha \cdot \frac{120\pi DSn}{K} \qquad (14.1)$$

для сальников $$Q_с = \alpha \cdot \frac{120\pi dSn}{K} \qquad (14.2)$$

где $Q_ц$ и $Q_с$ — расход масла для цилиндра и сальника, *г/ч*;
$\alpha$ — коэффициент, равный для машин простого действия 1, а для машин двойного действия 1,2;
$D$ и $d$ — диаметры цилиндра и штока, *м*;
$S$ — ход поршня, *м*;
$n$ — число оборотов в 1 *мин*.

$K$ — коэффициент, принимается равным:

1) для вертикальных компрессоров низкого давления при конечном избыточном давлении 4 *кгс/см*² $K=400—550$; при 7 *кгс/см*² $K=360—450$;

2) для вертикальных четырехступенчатых компрессоров: I ступень $K=360—500$; II ступень $K=240—450$; III ступень $K=150—250$; IV ступень $K=100—170$;

3) для вертикальных пятиступенчатых компрессоров: I ступень $K=360—500$; II ступень $K=250—500$; III ступень $K=150—300$; IV ступень $K=140—250$; V ступень $K=100—170$;

4) для горизонтальных компрессоров значение $K$ принимается на 20% меньше, чем для вертикальных.

Для сальников $K$ принимается равным 100 (для всех типов машин).

Для малых компрессоров производительностью до 120 и 120—250 *м*³/*ч* расход смазки по формуле (14.1) увеличивают соответственно на 40—50% и на 10—15%. Эксплуатационный расход цилиндрового масла составляет 1,2—1,4 *г* (*л·с·ч*).

Расход смазки через каждую маслоподающую трубку контролируется по глазку; о количестве смазки судят по числу капель,

* Б. А. Иванов, Е. А. Мельников, Труды ВНИИкриогенмаш, вып. 13 (1971).

проходящих через глазок в 1 *мин*. Предварительно определяют массу 1 капли, для чего трубку на несколько минут отъединяют от места подачи смазки и собирают в бюретку 10—15 капель масла, затем взвешивают их и делят общий вес на число капель.

При диаметре маслоподающего сопла 2 *мм* масса 14—18 капель масла брайтсток составляет 1 *г/ч*. Для смазки сальников расход смазки можно принимать равным 3 *г/ч* на каждые 100 $м^2$ поверхности, пробегаемой штоком в сальнике за 1 *ч*.

Периодически, 1—2 раза в месяц, проверяют общий расход масла на компрессор по указателю уровня масла в лубрикаторе. При отклонении от установленных норм подачи масла более чем на 15—20% вновь регулируют подачу и повторно определяют массу капли.

**Улучшение работы холодильников и масловлагоотделителей.** При эксплуатации компрессора необходимо добиваться максимального снижения температуры сжатия в цилиндрах компрессора, устранения нагара, производить очистку поверхности труб холодильников от накипи, не допускать пропуска в клапанах и поршневых кольцах и своевременно удалять отложения накипи на стенках охлаждающих рубашек цилиндров. Температура конца сжатия не должна превышать 145 °С в ступенях, где избыточное давление сжатия выше* 70 $кгс/см^2$. Очистку рубашек цилиндров и холодильников производят не реже 2 раз в год, промывая их 10%-ным раствором соляной кислоты, а затем чистой водой во избежание коррозии. Змеевиковые холодильники очищают от накипи механическим способом — обстукиванием, очисткой щетками, скребками и т. п. При нормальной работе холодильников температура воздуха после них должна превышать температуру охлаждающей воды перед холодильником не более чем на 8—10 °С.

Для уменьшения уноса масла в воздухоразделительный аппарат полезно в ряде случаев ставить дополнительные холодильники (после компрессора) с масло-влагоотделителями. Следует стремиться к тому, чтобы температура воздуха, поступающего в воздухоразделительный аппарат, даже в наиболее жаркое время года не превышала 20 °С. Дополнительные масло-влагоотделители для лучшего улавливания капельного масла рекомендуется заполнять насадкой из колец Рашига.

Целесообразно применять эффективные масло-влагоотделители с автоматической продувкой (см. гл. 10).

Весьма эффективно понижение температуры сжатого воздуха с помощью азотно-водяных испарительных холодильников.

---

* В компрессорах, где на последних ступенях вследствие высоких степеней сжатия температура в конце сжатия превышает 145 °С, при избыточном давлении свыше 70 $кгс/см^2$ целесообразно осуществлять мероприятия по перераспределению степеней сжатия по ступеням или производить замену компрессора другим, имеющим более благоприятное распределение давлений и температур по ступеням.



**Адсорбционная осушка воздуха активным глиноземом.** Адсорбционная осушка воздуха сопровождается одновременной очисткой его от паров легких фракций масла, попадающих в кислородный аппарат вместе со сжатым воздухом. Следует систематически (не реже 1 раза в год) проверять, не загрязнен ли адсорбент маслом и при необходимости заменять его свежим. Адсорбент, загрязненный маслом, изменяет свой цвет на более темный.

При температуре сжатия выше 150 °С замену адсорбента в блоках осушки производят 2 раза в год. При отсутствии свежего адсорбента для замены можно использовать прежний адсорбент повторно, после восстановления его поглотительной способности прокаливанием при 480 °С — в среде азота. Адсорбент удаляют из блока осушки пылесосом типа ПП-ЧМ в течение 10—15 *мин*. Бескрейцкопфные компрессоры со смазкой разбрызгиванием (ранее использовавшиеся в некоторых установках) должны заменяться компрессорами с принудительной смазкой цилиндров от лубрикатора.

**Контроль количества смазки, подаваемой в цилиндр детандера.** Количество масла, подаваемого в цилиндр детандера, должно быть минимально необходимым. Ориентировочно это количество определяется по формуле (14.1) для последних ступеней компрессоров высокого давления. Обычно подается 2—4 капли в 1 *мин*. Подача масла может быть достаточно точно отрегулирована пневмолубрикатором. Желательно использование детандеров, работающих без масляной смазки цилиндров.

**Предупреждение попадания в цилиндр детандера машинного масла из картера.** Масло может попасть через зазор между поршнем и стенкой цилиндра горизонтальных и вертикальных детандеров. Для предупреждения этого на торце цилиндра (со стороны крейцкопфа) ставят два чугунных маслослизывающих полукольца, заключенных в металлические обоймы (рис. 14.4).

**Улучшение работы детандерных фильтров.** Основным средством защиты от попадания в кислородный аппарат масла, содержащегося в детандерном воздухе, являются детандерные фильтры. Фильтрующие цилиндры покрыты сверху чулком из бязи, на который надевается второй чулок из серого шинельного сукна (грубошерстного). Чулок из сукна улавливает частицы твердого масла, а из бязи — предотвращает занос в аппарат ворсинок сукна. Чулки должны быть плотно закреплены по концам цилиндров проволокой, так, чтобы воздух не мог пройти минуя фильтрующую ткань. Против трубы ввода воздуха в корпус фильтра устанавливают металлический козырек для предотвращения разрыва ткани потоком воздуха. Сборку фильтра следует производить особо тщательно; места посадки фильтрующих вставок в корпусе уплотняют кожаными прокладками. Так как сопротивление фильтра увеличивается вследствие забивания его твердой двуокисью углерода, необходимо во избежание разрыва ткани при повышении перепада давления в фильтре до 0,5 $кгс/см^2$ отключить фильтр (включив в работу вто-

рой) и отогреть его азотом до —50 °С. После 3—4-кратких отогревов или если перепад давления в фильтре достигает 1 *кгс/см²* фильтр отключают и подвергают полному отогреву до положительной температуры, затем вынимают и промывают растворителем без снятия фильтрующей ткани. Для промывки фильтр помещают в герметически закрытый сосуд, через который центробежным насосом прокачивается растворитель в течение 1 *ч*. После этого растворитель сливают и фильтр, не вынимая из промывного устройства, продувают отходящим азотом с температурой от 50 до 70 °С для удаления остатков растворителя и влаги. На промывку одного фильтра требуется 50 *кг* растворителя. Продувка азотом продолжается 10—20 *ч*. В случае обнаружения разрыва ткани ее необходимо заменить новой.

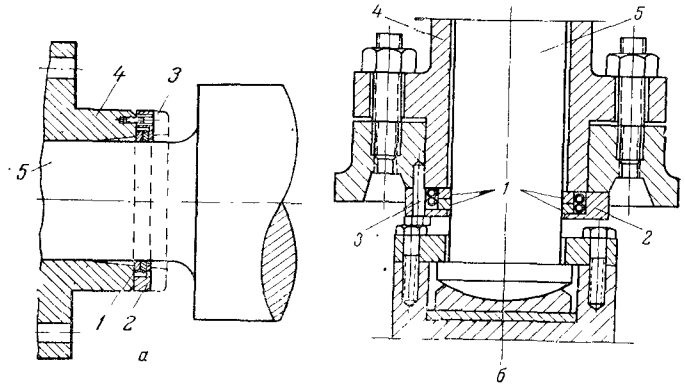



Рис. 14.4. Установка маслослизывающих колец на поршневом детандере:
*а* — горизонтальном; *б* — вертикальном; *1* — маслослизывающие чугунные разрезные кольца; *2* — обойма; *3* — крепежный винт; *4* — цилиндр детандера; *5* — поршень.

Непрерывная работа детандерного фильтра может продолжаться не более 10 суток, после чего производится отогрев фильтра и промывка фильтрующего элемента. Запрещается работа детандерного фильтра с перепадом давления более 1 *кгс/см²*. Контролировать состояние фильтрующей ткани необходимо при каждой промывке. Перед установкой чистого фильтрующего элемента корпус фильтра протирают салфеткой, смоченной чистым растворителем.

Для улавливания небольших количеств масла, случайно проскакивающих через основные детандерные фильтры, после них ставится дополнительный (контрольный) фильтр (рис. 14.5). Контрольный фильтр проверяют при полном отогреве детандера, но не реже 1 раза в 3 месяца, а также при повышении его сопротивления более



0,5 *кгс/см²*. В случае сильного загрязнения контрольного фильтра маслом необходимо выяснить причину и устранить ее*.

Для предотвращения заброса жидкости из куба нижней колонны в детандерный фильтр на трубе ввода детандерного воздуха в куб колонны ставят обратный клапан и вентиль для проверки его герметичности. Проверка производится в сроки, установленные инструкцией.

**Периодическое обезжиривание кислородного аппарата, стационарных и транспортных емкостей.** Описание этого способа предотвращения загрязнения воздуха маслом приводится ниже в разд. 14.6.

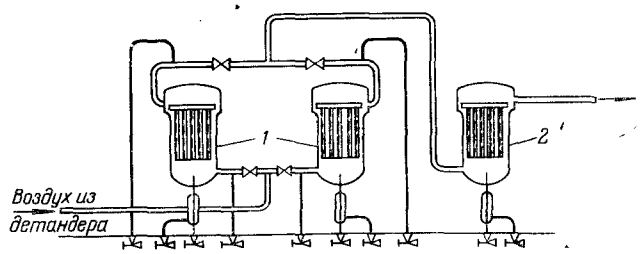



Рис. 14.5. Фильтры для очистки детандерного воздуха от масла:
*1* — основные фильтры детандерного воздуха; *2* — дополнительный (контрольный) фильтр.

**Применение дополнительного проточного конденсатора.** Данный способ используется в установках КГ-300М, КТ-1000М и др.

**Оснащение воздухоразделительных установок цеолитовыми блоками комплексной очистки и осушки воздуха.** Этими блоками рекомендуется оснащать установки высокого и среднего давления, находящиеся в эксплуатации и укомплектованные аппаратурой для щелочной очистки воздуха от $CO_2$ и блоками адсорбционной осушки. Для предварительного охлаждения воздуха перед цеолитовыми блоками могут применяться специальные охлаждающие агрегаты типа ОФ с фреоновым компрессором, выпускаемые одесским заводом «Автогенмаш».

**Использование поршневых компрессоров и детандеров с фторопластовыми уплотнительными поршневыми кольцами.** Эти машины

---

* Имеется положительный опыт использования только двух фильтров, включенных последовательно по схеме, обеспечивающей включение любого из двух фильтров так, чтобы он работал первым по ходу воздуха. В этом случае второй фильтр является контрольным. При этом чугунные кольца детандера ДСД-5 заменяют на текстолитовые, что позволяет снизить подачу масла в цилиндр детандера почти в 50 раз по сравнению с подачей масла при использовании колец из чугуна (см. Кислородная промышленность, Гипрокислород № 3, НИИТЭХИМ, 1969).

не нуждаются в применении масла для смазки цилиндров, что полностью решает вопрос защиты воздухоразделительных аппаратов от попадания масла.

**Применение фильтров.** Для очистки воздуха от механических примесей в настоящее время используются фильтры, сетки которых смачиваются не маслом, а водно-глицериновым раствором, а также сухие фильтры.

## 14.6. ОБЕЗЖИРИВАНИЕ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Сведения о порядке обезжиривания, применяемых растворителях, регенерации и контроле растворителей на содержание масла и т. д. изложены в ОСТ-26-04-312—71*.

Для удаления масла и продуктов его разложения блоки разделения воздуха должны обезжириваться путем промывки их растворителями.

Обезжиривание блоков разделения производится в следующие сроки:

| | |
|---|---|
| Установки с циклом: высокого давления; высокого давления с поршневым детандером; среднего давления; двух давлений с подачей воздуха низкого давления турбокомпрессорами и с поршневыми детандерами, КТ-1000 (КГ—300М) . . . . . | 1 раз в год |
| Установки с циклом двух давлений, с подачей воздуха низкого давления поршневыми компрессорами и с поршневыми детандерами с масляной смазкой . . . . . | 2 раза в год |
| Установки КТ—3600 и КТ—3600 Ар . . . . . | 1 раз в 6 лет |

Обезжиривание блоков разделения установок низкого давления не регламентируется, но выполняется по особым указаниям завода-изготовителя, если содержание масла в жидком $O_2$ систематически более 0,4 *мг/дм*³.

Очередное обезжиривание блока разделения воздуха можно не производить, если в течение всего периода эксплуатации после последнего обезжиривания содержание масла в жидком кислороде в конденсатора не превышает 0,01 *мг/дм*³.

Продувки блоков разделения после обезжиривания производятся до полного исчезновения запаха растворителя в продувочном воздухе, выходящем из блока. Ремонтировать блоки после обезжиривания можно только при отсутствии запаха растворителя в выходящем воздухе продувки или если анализом воздуха из помещения (места), где проводились ремонтные работы, установлено, что содержание растворителя находится в пределах санитарных норм.

При ремонте блоков разделения с частичным или полным удалением изоляции проверяют состояние опор и крепежных деталей всех аппаратов и коммуникаций, к которым имеется доступ, с занесением в журнал результатов осмотра. Нарушение покрытий из оцинкованного железа на опорах должно быть устранено при ремонте. При капитальном ремонте деревянные части опор и подкладок следует заменять на асбоцементные.

Для защиты от статического электричества аппараты блока разделения должны быть заземлены согласно РТМ 26-04-8—67 (ВНИИкриогенмаш).

В установках с адсорбционной осушкой воздуха унос в аппарат паров и продуктов разложения масла значительно меньше, так как эти вещества удерживаются адсорбентом в блоке осушки. Поэтому промывку такого аппарата производят только при наличии явных признаков попадания в него масла (например, при появлении запаха масла в жидком кислороде или обнаружении масла анализом жидкости).

Для промывки воздухоразделительных аппаратов установок, снабженных детандерами и кислородными насосами, необходимо отсоединить соответствующие трубопроводы с тем, чтобы в детандер и насос не попал растворитель.

В качестве растворителей при обезжиривании применяются технический четыреххлористый углерод* марки А по ГОСТ 4—65 и чистый марки ч. д. а. по ГОСТ 5827—68; трихлорэтилен по ГОСТ 9976—62 и тетрахлорэтилен по ВТУ У-14-60. Содержание хлоридов в растворителях не должно превышать 0,0005% во избежание коррозии медных труб и аппаратов. Растворители перед употреблением должны быть проверены по следующим показателям: внешний вид и цвет; содержание нелетучего остатка; pH среды и содержание масла по инструкции ВНИИкриогенмаш. При несоответствии показателей требованиям ТУ и ГОСТ растворители должны быть очищены перегонкой.

Содержание масла в растворителях, применяемых для чистового обезжиривания, должно быть не более 50 *мг/дм*³; в растворителях для первичного обезжиривания — не более 500 *мг/дм*³. В случае использования такого растворителя для первичного обезжиривания обязательна повторная промывка чистым растворителем.

При работе с растворителями необходимо соблюдать правила техники безопасности, в частности нельзя проливать растворитель на пол, растворитель следует хранить в сосудах с герметической пробкой, помещение следует усиленно проветривать.

Предельно допустимые концентрации в воздухе трихлорэтилена 10 *мг/дм*³, четыреххлористого углерода — 20 *мг/дм*³. Для тетрахлорэтилена нормы не установлены; он менее токсичен, чем четыреххлористый углерод и трихлорэтилен.

---

* Отраслевой стандарт ОСТ—26—04—312—71, Оборудование кислородное. Методы обезжиривания, Применяемые материалы, ВНИИкриогенмаш.

* Четыреххлористый углерод кипит при 76,7 °С, плотность 1,59 *г/см*³, относительная летучесть 3; негорюч, не образует с кислородом взрывчатых смесей; не вызывает коррозии металла; ядовит; разрушает алюминий при температуре выше 60 °С.

Четыреххлористый углерод и другие хлорированные углеводороды при соприкосновении с пламенем или накаленными предметами разлагаются, образуя токсичный газ—фосген. Последний может также образоваться при курении в помещении, воздух которого загрязнен парами растворителей. Все лица, производящие обезжиривание, должны быть снабжены спецодеждой и противогазами, а также хорошо знать инструкцию по технике безопасности при работе с растворителями. Подробные указания по технике безопасности приведены в упомянутых выше руководящих материалах по обезжириванию оборудования, работающего в среде кислорода.

В блоках разделения воздуха обезжириванию подлежат верхние и нижние колонны; аппараты и коммуникации на потоке воздуха от поршневого детандера, включая фильтрующие элементы детандерных фильтров; аппараты и коммуникации на потоках кубовой жидкости, жидкого кислорода и криптонового концентрата.

Если одновременно с обезжириванием необходимо промыть блок водой (для удаления отложений щелочи), то сначала производят обезжиривание, затем тщательную продувку и просушку блока, а затем — промывку водой с последующей продувкой и просушкой. Выполнять эти операции в обратном порядке запрещается. Ориентировочные расходы растворителя для однократной промывки блоков разделения следующие:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Установки | АжК-0,02 (УКА-0,11) | АК-0,1 (АКГН-115/18) | К-0,15 (КГСН-150) УКГС-100 АК-0,6 | К-300М |
| Расход растворителя, *дм*³ | 50 | 70 | 250 | 600 |
| Установки | АК-2 (ГЖА-2000) | КЖ-1,6 КжАр-1,6 КжК-1,6 (КТ-1000) | КТ-3600 КТ-3600Ар | |
| Расход растворителя, *дм*³ | 700 | 1100 | 2500 | |

Коммуникации и внутренние полости теплообменников обезжиривают циркуляцией растворителя в промываемых полостях в течение 1—1,5 *ч*. Обезжиривание аппаратов, имеющих значительный объем (конденсаторы, куб нижней колонны, регенераторы и др.) производят заполнением их растворителем на $^3/_4$ объема с последующим барботажем воздухом или азотом в течение 1—1,5 *ч*. Адсорберы обезжиривают после извлечения из них адсорбента протиркой растворителем корпуса и корзины. Обезжиривать адсорберы в сборе запрещается.

При обезжиривании коммуникаций внутритрубных поверхностей теплообменников методом конденсации воздух вытесняют парами растворителя, которые подают в промываемые узлы в течение 1—1,5 *ч*. Обезжиривание заканчивают, когда содержание масла в растворителе после обезжиривания превышает содержание масла до обезжиривания не более чем на 20 *мг/дм*³.



Воздухоразделительный аппарат перед обезжириванием тщательно отогревают. Обезжиривание ведут циркуляционным методом с помощью центробежного насоса, в направлении, обратном нормальному потоку газа, т. е. начиная с верхней колонны.

На рис. 14.6 и 14.7 приведены в качестве примера схемы обезжиривания циркуляционным способом блоков разделения КГ-300-2Д и Г-540.

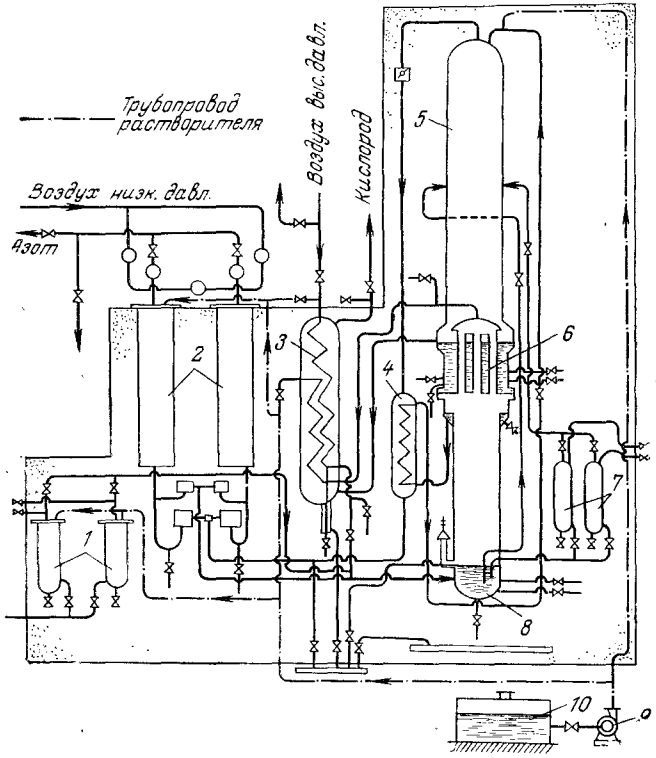



Рис. 14.6. Схема обезжиривания воздухоразделительного аппарата КГ-300-2Д:
*1* — детандерные фильтры; *2* — регенераторы; *3* — теплообменник; *4* — переохладитель азотной флегмы; *5* — верхняя колонна; *6* — конденсатор; *7* — адсорберы ацетилена; *8* — куб нижней колонны; *9* — центробежный насос ЦВС-0,9; *10* — бак с растворителем емкостью 750 *дм*³.

Продолжительность циркулярного обезжиривания аппаратов блока КГ-300-2Д составляет: верхней и нижней колонны — по 1 *ч*; теплообменника — 1 *ч*; регенераторов азотных — по 1,5 *ч* каждого. Общая продолжительность обезжиривания блока разделения 12—16 *ч*. Потребное количество четыреххлористого углерода 600 *кг* (расход растворителя составляет 60—80 *кг*). Продолжительность продувки после обезжиривания 20—24 *ч*.

В установке КГ-300М после основного конденсатора обезжиривают выносной конденсатор и отделитель жидкости, подавая в эти аппараты растворитель через вентиль слива жидкого кислорода из основного конденсатора в выносной.

Продолжительность циркуляционного обезжиривания аппарата Г-540 составляет: теплообменники *2* и *4* (рис. 14.7) — 2 *ч;* верхняя

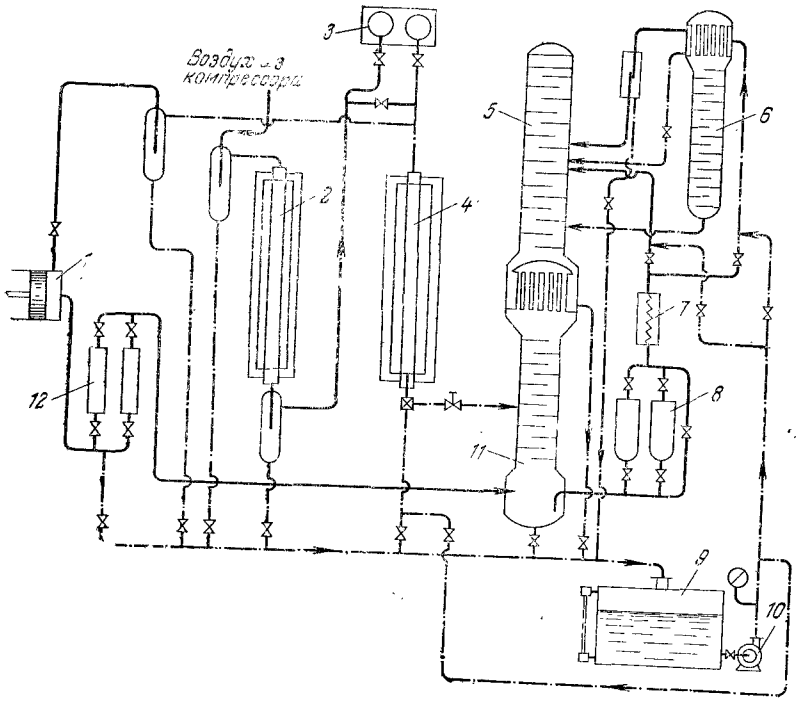



Рис. 14.7. Схема обезжиривания воздухоразделительного аппарата Г-540: *1* — детандер; *2* — предварительные теплообменники; *3* — блок осушки; *4* — основной теплообменник; *5* — верхняя колонна; *6* — аргонная колонна; *7* — переохладитель кубовой жидкости; *8* — адсорберы ацетилена; *9* — бак растворителя емкостью 750 *дм*³; *10* — центробежный насос IBC-0,9; *11* — нижняя колонна; *12* — фильтры детандерного воздуха.

*5* и нижняя *11* колонны — по 1 *ч;* переохладитель 7—15 *мин.* Продувка после обезжиривания подогретым до 50—60 °С азотом — 80 *ч.* Количество подаваемого азота примерно равно половине количества перерабатываемого воздуха. Для обезжиривания воздухоразделительного аппарата Г-540 требуется 1—1,2 *т* четыреххлористого углерода.

Для промывки аппаратов воздухоразделительных установок методом циркуляции и наполнения ВНИИкриогенмашем созданы специальные установки. Применяются установки двух типов: с баком емкостью 300 *дм*³, для промывки аппаратов установок КГН-3, КГСН-150, ЖА-300 и с баком емкостью 1500 *дм*³ — для установок КЖ-1, КТ-1000, ГЖА-2000, КГ-300.



## 14.7. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ЗАГОРАНИЯ В КИСЛОРОДНЫХ ТУРБОКОМПРЕССОРАХ*

При эксплуатации воздухоразделительных установок для получения технологического кислорода были случаи загорания кислородных центробежных компрессоров КТК-12,5/35, работающих при конечном избыточном давлении сжатия 35 *кгс/см*². Большинство загораний происходило в третьем корпусе компрессора. Наиболее вероятной причиной является загорание герметика (свинцового глета, разведенного на глицерине), применяемого для уплотнения крышки и корпуса. В среде сжатого до 10—20 *кгс/см*² кислорода могут загораться также тонкие элементы деталей из черных металлов (стали, чугуна) при незначительной скорости потока кислорода и наличии источника воспламенения (возникающего от трения или сгорания других материалов).

Такие герметики, как свинцовый глет на глицерине, бакелитовый лак — горючи и могут способствовать загоранию чугунных деталей толщиной 2—10 *мм.* Медь, сплавы меди и никеля, применяемые для гребней лабиринтных уплотнений, при толщине более 0,25 *мм* не могут гореть в кислороде при давлениях и температурах, имеющих место в компрессоре КТК-12,5/35.

Попадание масла на металлические детали в тех количествах, которые теоретически возможны в условиях эксплуатации компрессора КТК-12,5/35, не могут привести к загоранию даже самых тонких элементов деталей компрессора. В качестве основного возможного источника тепла и воспламенения следует считать кратковременное трение массивных деталей или длительное местное трение лабиринтных гребней о чугунные втулки.

Для предупреждения загорания кислородных турбокомпрессоров рекомендуются следующие мероприятия:

разработка способа уплотнения разъемов корпусов, исключающего попадание герметика в проточную часть машины;

замена закладных чугунных деталей третьего корпуса компрессора на детали из латуни или других медных сплавов;

применение материалов в кислородном оборудовании только после проверки их на взрыво- и пожаробезопасность;

регламентирование допускаемого количества масла в перерабатываемом воздухе и продуктах его разделения для обеспечения безопасности работы воздухоразделительных установок и чистоты получаемых продуктов.

## 14.8. ПРОЧИЕ ИСТОЧНИКИ ОПАСНОСТЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ КИСЛОРОДА

Персоналу, обслуживающему установки разделения воздуха, приходится иметь дело с едкой щелочью и ее крепкими растворами;

* Иванов Б. А. О причинах загорания кислородных центробежных компрессоров типа КТК-12,5/35, Гипрокислород, Кислородная промышленность, НИИТЭХИМ, 1969.

газами и жидкостями с очень низкой температурой; с аппаратами и баллонами, находящимися под высоким давлением; с движущимися частями и приборами. Поэтому во избежание несчастных случаев необходимо строго соблюдать правила и инструкции по технике безопасности. Возможны, хотя и достаточно редки, следующие случаи:

поражение кожи и глаз при измельчении едкого натра, приготовлении щелочного раствора, перезарядке осушительных баллонов и декарбонизаторов;

обмораживание при соприкосновении с жидким кислородом, воздухом или азотом, а также с холодными частями аппаратов;

засорение глаз, раздражение кожи и дыхательных путей шлаковой ватой;

воспламенение насыщенной кислородом одежды от электрической искры или пламени;

получение травмы от движущихся частей машин — маховиков, шатунов, тяг, шестерен и пр. (при неосторожном обслуживании);

поражение электрическим током (при нарушении правил эксплуатации электрических установок);

отравление парами растворителя при обезжиривании воздухоразделительного аппарата и деталей или парами аммиака при негерметичности аммиачной системы;

разрывы трубопроводов, взрывы сосудов и аппаратов, работающих под давлением, а также взрывы наполненных кислородом баллонов (при несоблюдении правил обращения с ними);

воспламенение прокладок, влекущее за собой загорание частей арматуры, находящейся в атмосфере сжатого кислорода;

вспышка масла в цилиндрах и холодильниках компрессора (вследствие нарушения правил смазки);

вспышка в кислородных компрессорах и кислородопроводах при попадании в них масла или по другим причинам;

взрывы в помещении вследствие утечек (через неплотности арматуры и трубопроводов) из баллонов водорода, используемого для аналитического контроля; это обусловлено свойством водорода проникать через малейшие неплотности и образовывать с воздухом взрывоопасные смеси.

Для предупреждения аварий и несчастных случаев необходимо строгое соблюдение производственной дисциплины, правил эксплуатации оборудования и инструкций по технике безопасности. При выполнении этих требований получение кислорода и других продуктов разделения воздуха совершенно безопасно для обслуживающего персонала.

## 14.9. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ШУМА

Основными источниками шума в воздухоразделительных цехах являются компрессоры и газодувки, зубчатые редукторы, детанденсаторы, выхлопы отбросных газов в атмосферу и др. Общий уровень



шума от работы компрессоров достигает 96 *дб*. Уровень шума определяется размером и конструкцией компрессора. Наибольший шум дают компрессоры с зубчатыми редукторами.

Для уменьшения шума рекомендуется*:

сброс воздуха из нагнетательной линии компрессоров производить через всасывающую трубу компрессора;

установка глушителей на линиях выхлопа отбросного азота;

установка звукоизолирующих кожухов на зубчатые редукторы, изготовляя их из стали толщиной 3—4 *мм* и окрашивая с внутренней стороны мастикой 580 и 213 ярославского завода «Победа рабочих» или мастикой антивибрат 2;

применение акустической обработки потолка и стен в цехах с высоким уровнем шума;

использование индивидуальных средств защиты от шума (антифонов, противошумных тампонов ПТ-ФПП, ВЦНИИОТ-2, баропшумозащитных втулок из пенолатекса типа БВИ и др.).

С целью улучшения условий труда обслуживающего персонала в качестве профилактической меры используют периодическое пребывание людей в звукоизолированной кабине (например, ЛИОТ) в течение 5—10 *мин* через каждые 1—1,5 *ч* работы.

Измерения вибрации в действующих цехах показало, что уровни виброскорости находятся значительно ниже предельно допустимых норм.

## 14.10. СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Для предупреждения несчастных случаев применяются также средства индивидуальной защиты, пользование которыми обязательно.

**Защита от едкой щелочи.** Работающие в щелочном отделении кислородных установок должны при обращении со щелочью надевать плотную брезентовую спецодежду, защитные бесцветные очки, исправные резиновые перчатки, сапоги и фартуки. В случае попадания едкой щелочи или ее раствора на кожу необходимо тотчас же удалить щелочь с помощью ваты, а затем промыть пораженное место чистой водой, 2—3%-ным раствором борной кислоты или 0,25%-ным раствором уксусной кислоты, после чего смазать пораженное место вазелином. При сильном поражении необходимо немедленно обратиться к врачу.

**Защита от пыли минеральной ваты.** Работающим на загрузке и выгрузке ваты следует надеть плотную брезентовую спецодежду и резиновые сапоги с выпущенными поверх брюками; куртку плотно затягивать ремнем, а рукава ее завязать. На лицо следует на-

---

* Шульга П. М., Белуха В. Ф., Епифанова З. С., Кислородная промышленность, Гипрокислород, № 2, НИИТЭХИМ, 1969.

деть маску-респиратор, защищающую глаза и дыхательные пути от попадания мельчайших частиц пыли.

**Защита от паров растворителя и аммиака.** Работа с растворителем и аммиаком должна производиться в хорошо проветриваемом помещении. Выделяющиеся из аппарата и трубопроводов пары растворителя и аммиак должны отводиться по шлангу из помещения. В случае необходимости работающие снабжаются шланговыми противогазами ПШ-1 или ПШ-2.

При промывке деталей, трубопроводов и воздухоразделительных аппаратов от масла необходимо следить за содержанием в рабочих помещениях аммиака, паров четыреххлористого углерода и других растворителей, концентрация которых не должна превышать величины, указанные в СН 245—63 «Предельно допустимые концентрации ядовитых газов, паров и пыли в воздухе рабочих помещений».

При появлении признаков отравления парами растворителя (головная боль, тошнота, кашель) нужно немедленно вывести пострадавшего на свежий воздух, дать ему подышать в течение 2—3 *мин* чистым кислородом и направить в пункт первой помощи.

При ожогах кожи жидким аммиаком пораженное место следует смочить раствором виннокаменной или уксусной кислоты, а затем смазать вазелином. В случае отравления газообразным аммиаком поступают так же, как и при отравлениях парами растворителей, но пострадавшему, кроме кислорода, дают дышать парами уксусной кислоты.

**Защита от воспламенения насыщенной кислородом одежды.** При работе с газообразным или жидким кислородом необходимо остерегаться насыщения кислородом одежды, тканей, обтирочного материала и пр., так как возможна их вспышка от электрической искры или пламени. Известны случаи, когда насыщенная кислородом одежда или волосы людей вспыхивали при приближении к открытому огню или под действием искры, возникшей от накопления статического электричества, при курении и пр.

Достаточно пробыть некоторое время в помещении, воздух в котором содержит более 40% кислорода (например, при испарении жидкого кислорода, пролитого на пол, сильном пропуске в трубопроводах и пр.), чтобы одежда пропиталась кислородом. Если есть опасения, что одежда насыщена кислородом, нужно выйти из помещения и проветрить ее.

Во всех помещениях, где возможно насыщение одежды обслуживающего персонала кислородом, рекомендуется устанавливать автоматически действующие противопожарные душевые установки для быстрого тушения огня при загорании одежды.

При производстве ремонтных работ с применением сварки и резки в местах, где возможно скопление обогащенного кислородом воздуха (в траншеях кислородопроводов, колодцах и пр.), предварительно необходимо анализировать воздух на содержание в нем кислорода. При содержании кислорода выше, чем в атмосферном



воздухе, производить работы с применением открытого огня воспрещается.

Особую осторожность следует проявлять при обращении с жидким кислородом, азотом и воздухом. Эти жидкости, попадая на кожу, могут вызвать тяжелые поражения, подобные сильному ожогу. Поэтому рекомендуется работы с жидким кислородом и другими ожиженными газами производить в комбинезоне из плотной ткани и перчатках.

**Защита от действия электрического тока.** Нельзя прикасаться к неизолированным токоведущим частям электродвигателей, приборов и проводов, находящихся под напряжением. Для включения двигателя необходимо надеть резиновые перчатки и стать на резиновый коврик.

Внутренний осмотр баллонов, машин и аппаратов во время ремонта следует производить, используя низковольтные электрические лампы напряжением 12—24 *в*.

Поражение электрическим током может быть местным, в виде ожога, или общим, когда пораженный теряет сознание. В последнем случае пострадавшему должна быть оказана немедленная помощь — его необходимо освободить от стесняющей части одежды, обрызгать лицо водой, растереть грудь или сделать искусственное дыхание. Если пораженный током держится за провод, нужно выключить ток, заземлить этот провод или приподнять пострадавшего от земли. При этом лица, оказывающие первую помощь, должны надеть резиновые перчатки и надежно изолировать себя от земли (встать на сухую доску, резину, надеть галоши и пр.). Поднимая пострадавшего, следует браться только за его одежду.

**Защита от движущихся частей машин.** Движущиеся части машин должны быть снабжены ограждениями. Протирать движущиеся части машины во время работы, а также прикасаться к ним руками запрещается.

## 14.11. БЕЗОПАСНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙ

Общие правила обслуживания воздухоразделительных установок заключаются в следующем.

К обслуживанию оборудования допускаются только лица, прошедшие соответствующую подготовку и усвоившие инструкции по обращению с оборудованием, технике безопасности и противопожарным мероприятиям.

Во время работы установок в цехе могут находиться только лица, непосредственно занятые обслуживанием оборудования, а из посторонних — имеющие специальное разрешение администрации. Лица в болезненном или нетрезвом состоянии к работе не допускаются.

В эксплуатацию могут быть пущены только исправные аппараты и машины, оснащенные необходимыми контрольно-измерительными приборами, предохранительными приспособлениями и арматурой.

Около каждой машины и аппарата должны быть вывешены на видном месте их схемы с указанием расположения трубопроводов, вентилей и точек контроля, а также инструкции по обслуживанию. Режим работы каждого аппарата и машины должен отвечать технологическому регламенту работу кислородной установки данного типа.

В кислородном цехе во время работы установки нельзя производить каких-либо строительных или ремонтных работ, особенно сварочных, без специального разрешения руководства цеха.

Строго запрещается производить чистку, протирку и ремонт движущихся частей машины, подтягивание гаек и т. п. операций во время ее работы.

Каналы и проемы в межэтажных перекрытиях цеха должны быть закрыты металлическими щитами, решетками или иметь ограждения.

При пуске, обслуживании и остановке аппаратов давление в них следует изменять медленно — плавным открыванием и закрыванием вентилей.

При обнаружении неполадок, грозящих аварией, необходимо немедленно остановить машину или аппарат и вызвать начальника цеха, приняв до его прихода неотложные меры по ликвидации неисправности.

В отделениях цеха должна соблюдаться чистота; нельзя допускать загромождения проходов и запасных выходов материалами и оборудованием. Необходимо предохранять детали и части аппаратов и машин, соприкасающиеся с кислородом, а также кислородные баллоны от попадания в них масла.

В цехе должен находиться набор запасных частей и инструмента по утвержденным нормам.

В случае возникновения аварии воздухоразделительный аппарат следует немедленно остановить. Никто из работающих не имеет права покидать рабочее место без разрешения начальника, за исключением случаев, когда создается непосредственная угроза жизни. Если авария сопровождается несчастными случаями, следует немедленно организовать оказание помощи пострадавшим и вызвать врача.

**Воздухоочистительные устройства.** Для предотвращения аварий воздухоочистительных устройств необходимо соблюдать следующие правила.

Начинать вскрытие и ремонт декарбонизаторов, скрубберов, блоков осушки и другого оборудования только после того, как в этих аппаратах снято давление и из них полностью удален раствор каустической соды. Это проверяют, открыв продувочные контрольные вентили, а также по показаниям манометров. Вскрываемый баллон должен быть отключен от воздухопроводов высокого давления и его продувочный вентиль полностью открыт.

Подтягивать болты и гайки осушительной аппаратуры и трубопроводов только тогда, когда аппарат не находится под давлением.



При работе с едким натром принимать меры предосторожности и индивидуальной защиты, указанные выше.

Контролировать исправность предохранительных клапанов, отрегулировать их на предельное рабочее давление, допускаемое для данного аппарата, а также проверять исправность обводного вентиля и обратного клапана, установленных между декарбонизатором и воздушным компрессором.

Аппаратура, работающая под давлением, должна подвергаться осмотру и гидравлическому испытанию в сроки, установленные правилами Госгортехнадзора.

**Воздушные и кислородные компрессоры.** Основные правила обслуживания компрессоров заключаются в следующем.

Машинист компрессора должен твердо знать правила обслуживания и точно соблюдать установленный технологический режим работы по давлению и температуре.

Ограждения всех движущихся частей компрессора должны находиться в полной исправности и иметь достаточную прочность.

Чистку движущихся частей компрессора, а также всякого рода исправления и ремонт (подтягивание болтов, затяжку клиньев и т. п.) нельзя проводить во время его работы. В случае чистки, ремонта и осмотра компрессора во время остановки должны быть приняты меры для предупреждения несчастных случаев в результате того, что в какой-либо части компрессора или трубопровода имелось остаточное давление. При вскрытии компрессора, трубопроводов, сосудов принимаются особые меры предосторожности: спускают полностью давление, болты ослабляют постепенно, не снимая сразу всех гаек. Запрещается подтягивать соединения трубопроводов и сосудов, находящихся под давлением.

Не допускать проливания масла около компрессора.

Подвальное помещение под компрессором должно быть совершенно сухим, хорошо освещено и не загромождено посторонними предметами.

Во время очередной остановки компрессоров обязательно проводить осмотр и мелкий ремонт оборудования, делать соответствующие отметки в цеховом журнале и пускать машины только проверив правильность (качество) выполнения ремонта. Во время планово-предупредительного ремонта тщательно осмотреть все движущиеся, опорные и крепежные детали компрессора для выявления дефектов (раковин, трещин и т. п.).

Строго соблюдать порядок включения и отключения декарбонизатора, а также продувки щелочеотделителей и масло-влагоотделителей компрессора во избежание засасывания щелочного раствора в цилиндры компрессора и возникновения гидравлического удара.

Следить за качеством масла, применяемого для смазки цилиндров компрессоров, и его соответствием требованиям инструкции по обслуживанию. Нельзя применять масло без анализа его в лаборатории. Разные сорта масла следует хранить в отдельных резервуарах, на которых указан сорт масла. Масленки для цилиндрового и

машинного масла применяют разной формы и окраски; на них должны быть указаны название и сорт масла.

Следить за работой подшипников и их смазкой. Промывать подшипники в установленные инструкцией сроки.

При появлении стука в цилиндре компрессора, а также при поломке какой-либо детали (штока, вала, пальца, шатуна, клапана и пр.) немедленно остановить компрессор и вызвать мастера или начальника цеха. В случае прекращения подачи тока или короткого замыкания в сети немедленно выключить электродвигатель компрессора.

При ненормальном распределении давления по ступеням компрессора (случаи «перегруза» или «недогруза») необходимо срочно сообщить об этом мастеру или сменному инженеру.

Следить за поступлением охлаждающей воды в холодильники и рубашки компрессоров и ее температурой. Если компрессор по недосмотру пущен без подачи охлаждающей воды или во время работы подача воды внезапно прекратилась, компрессор следует немедленно остановить. Охлаждающую воду можно вновь пускать лишь после того, как цилиндры компрессора будут достаточно охлаждены.

После каждой проточки цилиндры и вставные втулки подвергать гидравлическому испытанию на давление, в полтора раза превышающее рабочее давление.

Не пускать компрессор в ход, если предохранительные клапаны или манометры неисправны. Среди запасных частей компрессора должны быть резервные клапаны и манометры для каждой ступени группы компрессоров одного типа.

Очищать водяные рубашки цилиндров и холодильники компрессоров от грязи и накипи не реже 1—2 раза в год.

Проверять герметичность соединений трубопроводов.

Предохранять детали кислородного компрессора от попадания на них масла, для чего обезжиривать детали растворителем. Хранить детали в специальных шкафах и футлярах и обезжиривать руки при работе с этими деталями. Следить за тем, чтобы в дистиллированной воде, применяемой для смазки цилиндров, не было ни малейших следов масла. Тщательно контролировать работу маслосъемных сальников на штоке компрессора, своевременно менять набивку во избежание ее замасливания.

**Детандеры.** При обслуживании детандеров необходимо соблюдать следующие правила.

Место установки детандера должно быть хорошо освещено.

Вокруг гибкой передачи и маховика детандера должно быть установлено ограждение.

Подтягивать соединения, трубопроводы и части детандера, находящегося под давлением, запрещается.

Подача масла в цилиндр поршневого детандера должна соответствовать установленной норме; нельзя допускать излишней смазки; следует применять масло только той марки, которая обеспечивает нормальную и безопасную работу машины. Своевременно переключать и промывать воздушные фильтры, установленные для улавливания масла после детандера.



Регулярно очищать пружины предохранительного и выпускного клапанов от оседающих на них инея и льда; периодически продувать предохранительный клапан, не допускать его примерзания.

Систематически проверять действие регуляторов безопасности и автоматических клапанов или шиберов, прекращающих подачу сжатого воздуха в детандер при увеличении его оборотов выше допустимого предела.

При появлении стука в цилиндре или механизме детандера немедленно остановить машину и выяснить причину неполадки.

В случае внезапного прекращения подачи тока или обрыва гибкой передачи немедленно прекратить подачу воздуха высокого давления в детандер и затормозить машину.

Крепление поршня при сборке детандера после ремонта производить особо тщательно, так как ослабление гайки, крепящей поршень на штоке, может привести к аварии.

**Воздухоразделительные аппараты.** Ниже приведены некоторые правила безопасного обслуживания воздухоразделительных аппаратов.

При продувке аппарата персонал должен находиться сбоку от продуваемых вентилей.

Во время взятия проб, перекачивания и переливания жидкого кислорода не проливать его на пол и не допускать попадания кислорода на одежду и кожу.

Производить подтягивание болтов на фланцах, если трубопровод находится под давлением, запрещается.

Определять пропуск в соединениях только при помощи мыльной воды; применять для этого открытое пламя строго воспрещается. Не курить в помещении кислородного цеха.

Осторожно обращаться с приборами для анализа азота, где в качестве поглотителя кислорода применяется желтый фосфор.

Проверять заземление корпуса электровоздухоподогревателя; доливание воды в ванну производить только после выключения подогревателя.

Строго соблюдать установленный режим контроля содержания ацетилена и других взрывоопасных примесей в жидкости из куба нижней колонны и из конденсатора на всех этапах производственного процесса. Прекращать работу аппарата, если содержание взрывоопасных веществ превысит нормы, предусмотренные для данного аппарата.

Проверять содержание масла в жидком кислороде, следить за работой устройств для очистки воздуха от масла (блоков осушки, контрольных детандерных фильтров, маслослизывающих колес детандера и др.).

Своевременно производить переключение, отогрев и регенерацию адсорберов ацетилена.

Не производить вскрытие и ремонт холодных частей аппарата, в которых возможны отложения твердого ацетилена (особенно адсорберов и фильтров) без предварительного отогрева до положительной температуры и продувки азотом (или воздухом, если это допускается инструкцией).

Следить за показаниями контрольно-измерительных приборов. Показания приборов должны соответствовать нормам регламента.

После длительной остановки воздухоразделительных аппаратов пуск их можно производить только после предварительного отогрева и тщательной продувки.

Закрывать и открывать вентили, особенно расширительные, осторожно и постепенно.

Следить за тем, чтобы предохранительные клапаны верхней и нижней колонн были отрегулированы на давление, превышающее на 10% предельное рабочее давление; проверку клапанов производить при каждом отогревании аппарата.

Вентили и задвижки на линиях подачи воздуха в аппарат закрывать при остановке компрессора (поломка, прекращение подачи энергии и пр.).

Площадки обслуживания, расположенные на кожухе блока разделения воздуха, должны иметь ограждения.

Следить за герметичностью аппарата и его частей. При возникновении значительных неплотностей, особенно заметных после отогрева, остановить аппарат, снять изоляцию вблизи дефектного места, устранить неплотность и причину ее появления.

Если необходимо — проверить соединение на плотность.

**Резервуары (танки) и газификаторы для жидкого кислорода.** Основные правила техники безопасности при обслуживании танков и газификаторов:

запрещается курить и зажигать огонь вблизи кислородного газгольдера, кислородопровода, танка или газификатора с жидким кислородом;

газификаторы должны быть установлены в изолированных помещениях с отдельным входом;

отогревать вентили и трубки танка и газификатора можно только сухим горячим воздухом или азотом; отогрев открытым пламенем или нагретыми предметами запрещается;

указатели на танке, цистерне и холодном газификаторе должны быть исправны и наполнены жидкостью (тетрабромэтаном или метиленбромидом);

систематически проверять исправность и герметичность гибких шлангов для переливания жидкого кислорода; не пользоваться шлангами с пропуском жидкости или неисправными присоединительными гайками;

газификаторы регулярно отогревать, осматривать, испытывать гидравлическим давлением в сроки по инструкции, а в случае необходимости — промывать от масла; своевременно производить пневматические испытания резервуаров для жидкого кислорода;



при промывке от масла тщательно удалять остатки растворителя из газификатора, танка и коммуникаций продувкой нагретым воздухом или азотом;

запрещается газифицировать жидкий кислород с примесью масла свыше 0,01 *мг/дм*$^3$;

по окончании слива жидкого кислорода не допускать повышения давления в гибком шланге от испарения в нем остатков жидкости; необходимо выпустить газ из шланга для снижения давления в нем и только после этого осторожно разъединить шланг. Исключать возможность случайного и внезапного срыва шлангов.

**Баллоны.** Приводим основные правила техники безопасности при эксплуатации баллонов.

Не должно быть следов масла на руках, спецодежде и инструменте работающих. Тщательно следить за тем, чтобы масло не попало на вентили, прокладки и другие части кислородных наполнительных рамп.

Детали наполнительных устройств (трубы, вентили и пр.), соприкасающиеся со сжатым кислородом, должны изготовляться из красной меди и ее сплавов (латуни), не окисляющихся и не горящих в кислороде; в отдельных случаях, предусмотренных проектом и конструкцией аппаратов, разрешается применение нержавеющей и углеродистой стали.

Наполнительные устройства необходимо снабжать исправными, проверенными манометрами и предохранительными клапанами; маховички всех вентилей должны достаточно легко открываться и закрываться. Следует устранять резкие перегибы соединительных трубок и следить за исправностью фибровых прокладок.

Курение и зажигание огня в наполнительном помещении и складе баллонов запрещается. Полы в этих помещениях поддерживать в полной исправности.

Запрещается подтягивать соединения, находящиеся под давлением кислорода.

При пропуске кислорода в местах присоединения вентиля баллона к рампе или в сальнике вентиля баллон должен быть отключен от рампы, а пропуск устранен подтягиванием соответствующего соединения. Если это не поможет, сменить уплотняющую фибровую прокладку.

Вентили на кислородной рампе и баллонах открывать постепенно. Сначала слегка повернуть маховичок вентиля и только через несколько секунд, когда давление над клапаном сравняется с давлением под клапаном, продолжать открывание вентиля, медленно поворачивая маховичок.

На вентили баллонов, подготовленные к перевозке, должны быть завернуты колпаки. Перемещать баллоны следует на тележках, автопогрузчиках, электрокарах или в контейнерах подъемными кранами, переносить баллон на плечах запрещается. При перевозке баллонов на автомашинах их надо укладывать на подкладки или в специальные контейнеры; погрузку баллонов производить осто-

рожно, не допуская ударов друг о друга. В летнее время баллоны при перевозке и хранении следует покрывать брезентом для защиты от действия солнечных лучей.

В поступающих от потребителей на склад порожних баллонах должно быть остаточное избыточное давление до 0,5 *кгс/см*$^2$ для того, чтобы можно было проверить, какой газ находился в баллонах. Баллоны без остаточного давления газа направляют в ремонтную мастерскую для промывки водой.

Обращение с баллонами со сжатым кислородом, находящимся под высоким давлением, должно быть осторожным. На практике зафиксированы, хотя и весьма редкие, случаи взрыва кислородных баллонов.

Причинами взрывов могут быть:

1) износ стенок вследствие коррозии металла;

2) неудовлетворительное качество металла, из которого изготовлены баллоны;

3) дефекты, не замеченные при изготовлении баллонов (трещины, плены, складки, внутренние напряжения и пр.);

4) нарушение основных правил обращения с баллонами, наполненными кислородом (удары* наполненных баллонов о твердые предметы, попадание в баллоны масла, горючих газов и др.).

На заводах, выпускающих баллоны для сжатых, сжиженных и растворенных газов, находящихся под давлением, ведется тщательный контроль технологического процесса и качества изготовления этих баллонов. Правильно изготовленный баллон обладает достаточной прочностью, и работа с ним вполне безопасна. Тем не менее осторожное обращение с баллонами является одним из обязательных условий их эксплуатации.

При использовании кислорода для сварки и резки следует руководствоваться соответствующими Правилами**.

## 14.12. ПРОТИВОПОЖАРНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Процессы производства кислорода не создают непосредственной угрозы возникновения пожара, однако свойство кислорода усиливать процессы горения увеличивает опасность пожара в тех помещениях, где хранятся большие количества кислорода (в газгольдерных и наполнительных помещениях, на складах наполненных кислородом баллонов, в помещениях для танков и газификаторов в местах прокладки кислородопроводов и т. п.).

В кислородном цехе предусматривают необходимые противопожарные мероприятия, которые должен хорошо знать обслуживающий персонал.

---

* Удары особенно опасны зимой при низких окружающих температурах зимой (минус 40 °С и ниже).

** См. «Правила техники безопасности и производственной санитарии при производстве ацетилена, кислорода и газопламенной обработке металлов», утвержденные Президиумом ЦК профсоюза рабочих машиностроения, изд. 3-е, «Машиностроение», 1967.



Возможными причинами пожара в кислородном цехе могут быть:

неисправность электропроводки, короткие замыкания в электрической сети;

перегрузка электродвигателей;

грозовые разряды;

курение или зажигание в цехе огня, производство работ по сварке и резке;

воспламенение насыщенных кислородом горючих предметов, как-то: прокладок кислородных вентилей, обтирочных концов, одежды, а также желтого фосфора, применяемого для анализа азота;

взрывы водородо-воздушных и аммиачно-воздушных смесей;

загорания кислородопроводов, кислородных компрессоров, блоков осушки кислорода;

взрывы ацетилена, масла и других взрывоопасных смесей в воздухоразделительном аппарате;

взрывы кислородных газификаторов, насосов для жидкого кислорода, испарителей;

загорание пропитанной органическими веществами изоляции, загорание пропитанных жидким кислородом дерева, тканей и других горючих веществ и т. д.

Чтобы предотвратить возникновение пожара и иметь возможность быстро локализовать и потушить пламя необходимо обеспечить следующие условия.

Помещения цеха должны быть достаточно просторными, а пожарные проходы и запасные выходы в них свободны.

Доступ к установленным в цехе пожарным кранам, шлангам, огнетушителям и ящикам с песком должен быть свободным.

В цехе должны находиться противопожарные инструменты и средства защиты (лопаты, ведра, топоры, огнетушители, гидранты, войлок, ящики с песком и пр.), а обслуживающий персонал обязан знать, как ими пользоваться.

Хранение в кислородном цехе огнеопасных и горючих веществ (керосина, смазочных масел, обтирочного материала и пр.) допускается только в специально отведенных для этого местах в количестве не более суточного запаса, причем эти вещества должны храниться в закрытой металлической таре.

Курение и зажигание огня воспрещается в кислородном цехе, и в других цехах и помещениях, где возможно выделение кислорода в окружающий воздух (наполнения и хранения баллонов, газгольдеров, реципиентов, газификаторов, газификационных насосов и т. п., а также на территории кислородного завода (кроме специально отведенных для этого мест);

Сварку, резку, пайку и вообще работы, связанные с нагревом деталей горелкой, паяльной лампой или электрической сварочной дугой, разрешается производить в цехе только под наблюдением мастера, ответственного за выполнение работ и их безопасность в

пожарном отношении; вблизи от места проведения этих работ не должны находиться горючие материалы или легковоспламеняющиеся предметы.

Полы в помещениях, где возможен пролив жидкого кислорода или обогащенной кислородом жидкости, допускаются только с покрытием из неорганических материалов.

Перед началом каждой смены аппаратчики обязаны проверить подачу воды из пожарного водопровода.

Необходимо повседневно проверять, нет ли пропусков кислорода вследствие негерметичности арматуры, трубопроводов, газгольдеров и др., так как пропуск кислорода способствует повышению его концентрации в воздухе вблизи места пропуска и усиливает пожароопасность прилегающих участков цеха.

Ремонт кислородопроводов посредством сварки или пайки следует производить только после тщательной продувки их азотом, паром или воздухом для полного удаления кислорода.

В случае возникновения пожара в цехе обслуживающий персонал обязан:

немедленно вызвать заводскую пожарную команду и принять меры к ликвидации огня или предупреждению его распространения имеющимися на месте средствами; загоревшееся масло или воспламенившиеся промасленные материалы следует тушить огнетушителем, песком или азотом, при загорании изоляции электрических проводов необходимо немедленно обесточить линию; горящие деревянные предметы, бумагу, спецодежду и пр. нужно тушить водой;

остановить, если это необходимо, аппараты в соответствии с инструкцией и известить администрацию цеха и завода;

оставаться на рабочих местах согласно инструкции, выполнять распоряжения начальника смены или мастера.

## О МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ СИ

Согласно ГОСТ 9867—61, в СССР с 1 января 1963 г. введена Международная система единиц для предпочтительного применения во всех областях науки, техники и народного хозяйства, а также при преподавании. Международной системе присвоено краткое обозначение СИ (латинскими буквами SI), что означает «Система интернациональная». Система СИ принята в качестве Международной системы единиц измерения XI генеральной конференцией по мерам и весам, состоявшейся в Париже в октябре 1960 г.

Международная система СИ имеет шесть основных единиц измерения и две дополнительные. Основными являются: единица длины — метр (*м*), единица массы — килограмм (*кг*), единица времени — секунда (*сек*), единица температуры — градус Кельвина (°К), единица силы тока — ампер (*а*) и единица силы света — свеча (*св*). Дополнительными являются: единица плоского угла — радиан (*рад*), единица телесного угла — стерадиан (*стер*).

Кроме того, в систему СИ включены 27 важнейших производных единиц, выводимых из основных. К производным относятся, например, единицы: площади ($м^2$), объема, вместимости ($м^3$), частоты (герц, *гц*), линейной скорости (*м/сек*), линейного ускорения ($м/сек^2$), угловой скорости (*рад/сек*), углового ускорения ($рад/сек^2$), плотности, или объемной массы ($кг/м^3$), силы (ньютон, *н*), давления или напряжения ($н/м^2$), удельного веса ($н/м^3$), работы, энергии, количества теплоты (джоуль, *дж*), мощности (ватт, *вт*), электродвижущей силы (вольт, *в*), электрического сопротивления (*ом*), удельной теплоты (джоуль на килограмм



*дж/кг*), теплоемкости (*дж/град*), удельной теплоемкости [джоуль на килограмм — градус, (*дж/(кг·град)*)], потока тепла (ватт, *вт*), коэффициента теплопроводности [ватт на метр-градус, *вт/(м·град)*] и др.

Единица силы ньютон (*н*) представляет собой силу, которая сообщает покоящейся массе 1 *кг* ускорение, равное 1 $м/сек^2$.

Для обозначения кратных и дольных величин в системе СИ применяются следующие десятичные приставки:

| Кратность | Приставка | Сокращенное обозначение | Дольность | Приставка | Сокращенное обозначение |
|---|---|---|---|---|---|
| $10^{12}$ | тера | *Т* | $10^{-1}$ | деци | *д* |
| $10^{9}$ | гика | *Г* | $10^{-2}$ | санти | *с* |
| $10^{6}$ | мега | *М* | $10^{-3}$ | милли | *м* |
| $10^{3}$ | кило | *к* | $10^{-6}$ | микро | *мк* |
| $10^{2}$ | гекто | *г* | $10^{-9}$ | нано | *н* |
| 10 | дека | *да* | $10^{-12}$ | пико | *п* |

Например, киловатт (*квт*), килоджоуль (*кдж*), мегаджоуль (*Мдж*), меганьютон (*Мн*), сантиметр (*см*), миллиметр (*мм*), микрометр (*мкм*) и т. д.

Ниже приводятся пересчетные значения для ряда единиц в единицы СИ:

| | СИ |
|---|---|
| Микрон (*мк*) | 1 микрометр (*мкм*) $= 1 \cdot 10^{-6} м$ |
| Литр (*л*) | $1{,}000028 \cdot 10^{-3} м^3 = 1{,}000028\ дм^3$ |
| Миллилитр (*мл*) | $1{,}000028\ см^3$ |
| Тонна (*т*) | $10^3$ *кг* |
| 1 *м/мин* | 0,0167 *м/сек* |
| 1 $т/м^3$; 1 $кг/дм^3$; 1 $г/см^3$ | 1000 $кг/м^3$ |
| 1 $м^3/т$; 1 $дм^3/кг$; 1 $см^3/г$ | $10^{-3}$ $м^3/кг$ |
| 1 *кг/ч* | $278 \cdot 10^{-6}$ *кг/сек* |
| 1 $м^3/ч$ | $278 \cdot 10^{-6}$ $м^3/сек$ |
| 1 *л/ч* | $278 \cdot 10^{-9}$ $м^3/сек$ |
| 1 *л/мин* | $16{,}67 \cdot 10^{-6}$ $м^3/сек$ |
| 1 *кГ* (*кгс*) | 9,80665 *н* |
| 1 дина (*дин*) | $10^{-5}$ *н* |
| 1 $кГ/см^2$; 1 $кгс/см^2$ | $98066{,}5\ н/м^2 \approx 0{,}1\ Мн/м^2$ |
| 1 *ат* (атм. техн.) | $98066{,}5\ н/м^2$ |
| 1 *атм* (атм. физ.) | $101325\ н/м^2$ |
| 1 $кГ/мм^2$; 1 $кгс/мм^2$; 1 *мм вод. ст.* | $9{,}80665 \cdot 10^6\ н/м^2$ $9{,}80665\ Мн/м^2 \approx$ $\approx 10\ Мн/м^2$ |
| 1 *мм рт. ст.* | $133{,}332\ н/м^2$ |
| 1 $кГ \cdot м$ ($кгс \cdot м$) | 9,80665 *дж* |
| 1 *квт·ч* | $3{,}6 \cdot 10^6$ *дж* 3600 *кдж* |
| 1 *ккал* | 4186,8 *дж* 4,1868 *кдж* |
| 1 $кГ \cdot м/сек$ | 9,80665 *вт* |
| 1 *ккал/ч* | 1,163 *вт* |
| 1 *квт* | 1000 *вт* |
| 1 $ккал/м^3$ | 4186,8 $дж/м^3$ 4,1868 $кдж/м^3$ |
| 1 *ккал/кг* | 4186,8 *дж/кг* 4,1868 *кдж/кг* |
| Удельные теплоемкости: | |
| массовая | |
| 1 *ккал/(кг·град)* | 4186,8 *дж/(кг·град)* 4,1868 *кдж/(кг·град)* |
| объемная | |
| 1 $ккал/(м^3 \cdot град)$ | 4186,8 $дж/(м^3 \cdot град)$ 4,1868 $кдж/(м^3 \cdot град)$ |
| Коэффициенты теплопроводности | |
| 1 *ккал/(м·ч·град)* | 1,163 *вт/(м·град)* |
| 1 *кал/(см·сек·град)* | 418,68 *вт/(м·град)* |

Ниже приведено несколько примеров перевода величин, измеренных в метрической системе, в единицы СИ:

1. Давление кислорода в газгольдере 215 *мм вод. ст.* В единицах СИ это давление измеряется числом $9{,}80665 \cdot 215$ 2110 $н/м^2$.

2. Давление кислорода в баллоне 165 *кгс/см²* (*ат*). В единицах СИ имеем 98066,5·165 = 16,18·10⁶ *н/м²* = 16,18 *Мн/м²* ≈ 16,2 *Мн/м²*.

3. Временное сопротивление стали равно 32 *кгс/мм²*. В единицах СИ это равно 9,80665·32 = 314 *Мн/м²*.

4. Водяная емкость кислородного баллона 40,2 *л*. В единицах СИ это соответствует 1,000028·40,2 = 40,201 *дм³*.

5. При полном сгорании 1 *м³* ацетилена выделяется 11 500 *ккал/м³*. В единицах СИ это равно 4,1868·11 500 = 48 200 *кдж/м³*.

6. Удельная теплоемкость воздуха равна 0,2396 *ккал/(кг·град)*, что в единицах СИ соответствует 4,1868 0,2396 = 1,003 *кдж/(кг·град)*.

7. Удельная теплоемкость латуни 0,092 *ккал/(кг·град)*, что в единицах СИ соответствует 4,1868·0,092·0,385 *кдж/(кг·град)*.

8. Коэффициент теплопроводности меди 334 *ккал/(м·ч·град)*, что в единицах СИ составляет 1,163·334 = 388 *вт/(м·град)*.

9. Коэффициент теплопроводности минеральной ваты 0,050 *ккал/(м·ч·град)*, что в единицах СИ соответствует 1,163·0,050 = 0,058 *вт/(м·град)*.

10. Общий коэффициент теплопередачи в конденсаторе равен 500 *ккал/(м²·ч·град)*; в единицах СИ это соответствует 1,163·500 = = 581,5 *вт/(м²·град)*.

11. Энтальпия воздуха равна 114,5 *ккал/кг*, что в единицах СИ соответствует 4,1868·114,5 = 479,4 *кдж/кг*.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Бирман И. М., Зайцев Л. А., Эксплуатация и ремонт малых воздухоразделительных установок, Изд. «Металлургия», 1969.
2. Бродянский В. М., Меерзон Ф. И., Производство кислорода, 2-е изд., Изд. «Металлургия», 1970.
3. Бродянский В. М., Энергетика и экономика комплексного разделения воздуха, Изд. «Металлургия», 1965.
4. Временные указания по проектированию межзаводских трубопроводов газообразного кислорода, азота и аргона, ВСН1-69, Министерство химической промышленности СССР, 1969.
5. Горохов В. С., Аппараты установок для разделения воздуха, Изд. «Машиностроение», 1965.
6. Давыдов Н. И., Станции технологического кислорода, Изд. «Металлургия», 1964.
7. Денисенко Г. Ф., Файнштейн В. И., Техника безопасности при производстве кислорода, Изд. «Металлургия», 1968.
8. Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б., Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения, Госэнергоиздат, 1963.
9. Михайлов Е. И., Тонин В. Н., Автоматизация кислородных станций, «Металлургия», 1965.
10. Правила техники безопасности и производственной санитарии при производстве ацетилена, кислорода и газопламенной обработке металлов, 3-е Изд «Машиностроение», 1967.
11. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, изд. «Металлургия», 1971.
12. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения, под ред. В. И. Епифановой и Л. С. Аксельрода, т. 1 и 2, Изд. «Машиностроение», 1964.
13. Справочник «Кислород», под ред. Д. Л. Глизманенко, ч.1 и 2, Изд. «Металлургия», 1967.
14. Установки разделения воздуха и оборудование для хранения, транспортировки и газификации низкотемпературных жидкостей, Каталог-справочник, ВНИИкриогенмаш, издание ЦИНТИхимнефтемаш, 1970.




## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ


Абсолютная влажность воздуха 404
Абсолютная шкала 32
Автоматизация производства 681 сл.
Автомобильная газификационная установка 560, 561
Адиабатический к. п. д. 57
Адиабаты 45
Адсорбенты 400, 408
Адсорберы
  ацетилена 474—478
    газофазные 476, 477, 478
    диаметры 477
    техническая характеристика 477
  блока осушки 409, 411
Адсорбционная осушка воздуха 406 сл.
Адсорбция 400
Азот
  газообразный 26
  жидкий 26
  получение на установках высокого давления 605
  медицинский 26
  особой чистоты 26
  технический 26
  физические свойства 37, 38
Азото-кислородная смесь, состав 90
Активный глинозем 407, 408
Алюмогель 407
Аммиак 37, 38, 58, 417
Анализ газов 650 сл.
Антивибрат 727
Антифон 727
Антифрикционные материалы на основе фторопласта-4, состав 291
Аппараты
  блоков разделения воздуха 427 сл.
  воздухоразделительные см. Воздухоразделительные аппараты
  двукратной ректификации 102
Аппараты
  каталитической очистки воздуха от ацетилена 701
  однократной ректификации 101
  теплообменные см. Теплообменники
Аргон
  особой чистоты 27
  очистка сырого цеолитами 261
  получение 253 сл.
    сырого 254—256
    технического и чистого 256 сл.
  технический 26
  физические свойства 37, 38
  чистый газообразный 26, 27
Аргоно-дуговая сварка 434, 446
Арматура
  вентили для баллонов 502
  дроссельные вентили
    профили рабочей части 500
    расчет 500, 501
    с сильфоновым уплотнением 499
    с электроприводом 501
    упрощенной конструкции 497, 498
    усовершенствованной конструкции 498
  задвижки 493
  запорные вентили
    высокого давления 495, 496
    «холодные» 495
    угловой «холодный» 494
  обратные клапаны 501
  ремонт 504, 505
Асбестовый картон 488
Асбест шнуровой 490
Асболатунь 488
Атмосфера
    техническая 31
    физическая 31
Ацетилен 37, 38, 695
Аэрогель 510

Аэрогель окиси алюминия 511
Аэросил 511

Баббит
плотность 315
состав 316
Базальтовая (каменная) насадка 443, 445
Баллоны для сжатых газов
вентили 502, 503
емкость 567
зависимость давления от температуры 578
контейнеры 579
контроль на складе 680, 681
механизация на складах 578—582
механизированный склад 580
наполнение 566 сл.
правила техники безопасности при эксплуатации 735
ремонтная мастерская 582
стенды
для гидравлического испытания 576
для ремонта 581
техническая характеристика 566
хранение и испытания 572—577
цвет, надписи, полосы 567
Барошумозащитные втулки БВИ 727
Безопасная эксплуатация оборудования 729 сл.
Белая сажа 511
Брайтсток 301
Бронзовая пудра 513
Бронзовые фильтры 480
Бутан 697
Бутилен 697

Вакуум абсолютный 30
Вата минеральная 481
Вата СТВ (супертонное волокно) 481
Вентили запорные 494—496
Взрывоопасность масел 714
Взрывоопасные примеси воздуха 695—698
Вискозин 386
Висциновое масло 383, 386
Водоглицериновый раствор 386
Водород 37, 38
Воздух
взрывоопасные примеси 695—698
жидкий 29
значения дифференциального эффекта Джоуля—Томсона 52
измерение влажности 661—665
комплексная очистка цеолитами см. Комплексная очистка воздуха цеолитами
определение содержания двуокиси углерода 657—659



Воздух
осушка 404 сл., см. Осушка воздуха
очистка 383 сл., см. Очистка воздуха
примеси 23
разделение методом глубокого охлаждения 15
ректификация см. Ректификация воздуха
сжатый 29
сжижение 30 сл.
состав 23
физические свойства 37, 38
Воздухоразделительный(ые) аппарат(ы)
азотный однократной ректификации 101, 102
защита от статического электричества 721
кислородные
двукратной ректификации 102, 103
однократной ректификации 100, 101
места взрывов 694
правила эксплуатации 733, 734
распределение давлений, концентраций, температур 122
сроки обезжиривания 720
схемы обезжиривания 723, 724
циркуляционное обезжиривание 723
Воздухоразделительная(ые) установка(и)
аргона
очистка 257, 259, 261
схемы 255, 257, 260, 261
характеристики 259, 260, 262
высокого давления
назначение 157
принципиальные схемы 158
технологическая схема АКГ-115/18 159
уравнение теплового баланса 158
характеристика АКГ-115/18 160
высокого давления с насосом
блок разделения К-0,04 164
особенности К-0,04Т 165
причины дополнительных холодопотерь 161
режим работы К-0,04Т 165
технологические схемы 162, 163, 166, 169
уравнение теплового баланса 161
характеристики 167, 171
Воздухоразделительная(ые) установка(и)
газообразного и жидкого кислорода и азота, технические данные 238, 239
газообразного чистого азота и кислорода, технические данные 240—243
двух давлений
блоки разделения 182, 183
принципиальная схема 178
технологическая схема КГ-300М 179
уравнение теплового баланса 178
характеристика КГ-300М 181
жидкого кислорода и жидкого азота 220 сл.
высокого давления 220 сл.
низкого давления 229—231
принципиальные схемы 221, 229, 230
с циркуляционным азотным циклом 232, 233
технологические схемы 222, 224, 228, 232
уравнение теплового баланса 225, 229
зарубежных фирм 244 сл.
английских 244
итальянских 249
США 250
французских 246
ФРГ 246—249
японских 251
защита от статического электричества 721
классификация 156
криптона 263, 265, 267
технологическая схема УСК-1М 265
характеристика УСК-1М 266
ксенона 264, 267
мероприятия
по защите от взрыва 702, 705, 711, 712
при превышении норм содержания взрывоопасных примесей 706—709
неоно-гелиевой смеси 267—269
низкого давления
блоки разделения 197, 198, 202
кислородные регенераторы 200, 203
особенности 186
принципиальные схемы 187
производительность 186
рабочее давление 186
Воздухоразделительная(ые) установка(и) низкого давления
способы уменьшения разности температур на холодном конце регенератора 189
схемы тепловой петли 190, 191
технологические схемы 198, 204, 206, 208, 210, 214, 216, 218
удельный расход электроэнергии 188
уравнение теплового баланса 191, 213
обезжиривание 720 сл.
периодичность анализов для определения взрывоопасных примесей 704, 705
покрытие холодопотерь 82 сл.
правила эксплуатации воздухоочистительных устройств 730
предельное содержание взрывоопасных примесей в жидком кислороде 710
в технологических потоках 706
продувка блоков после обезжиривания 720
расход растворителей для промывки 722
редких газов 252 сл.
способы предотвращения загрязнения воздуха маслом см. Предотвращение загрязнения воздуха маслом
среднего давления
блок разделения К-0,15 176
принципиальная схема 172
технологические схемы 173, 175
уравнение теплового баланса 172
сроки обезжиривания блоков 720
технические данные
отечественных 235 сл.
зарубежных 245, 247, 248, 249, 250
уменьшение шума 727
Воздухоразделительный цех(а)
дальний воздухозабор, схемы 155
диспетчерский пункт управления 691
металлургического завода 148
минимальные разрывы до источников загрязнения 154
с тремя установками БР-1 151
с установками КА-5 153
химического комбината 146, 147
хозяйственная организация 144 сл.
Воздушный компрессор см. Поршневые компрессоры
Вредное пространство 271
Вредный объем 271

Газ(ы)
анализ 650 сл.
давление, единицы измерения 30, 31
диаграммы см. Диаграммы
дросселирование 49, 50
измерение влажности 661—665
коэффициенты сжимаемости 49, 50
параметры 30
плотность 33
работа при дросселировании 49
сжижение 35 сл.
смеси, свойства 30 сл.
содержание водяных паров 662
теплоемкость 39, 40
удельный вес 33
удельный объем 33
уравнение состояния 34
физические свойства 30 сл., 37, 38
холодильные циклы см. Циклы холодильные
энтальпия (теплосодержание) 42
Газгольдеры
высокого давления 508
низкого давления 507
Газификаторы безнасосные 556, 557
Газификационная(ые) установка(и)
автомобильная АГУ-6 561
правила техники безопасности 734, 735
с двухступенчатым кислородным насосом 548
с жидкостными насосами 558 сл.
стационарная СГУ-4 560
схема СГУ-1 559
технические данные 565
технологическая схема станции 564
Газификация жидкого азота 541, 562
Газификация жидкого кислорода 541, см. также Газификационные установки
Газоанализаторы кислорода
ГК-1 650, 651
термомагнитные 651, 652
техническая характеристика 654
Газовая постоянная 35
Газовые весы 659, 660
Гелий 29, 37, 38
Гемпеля метод 650
Глицерин 386, 524
Градусы ВУ 299
Графит 490, 537

Давление 30
абсолютное 30, 31
барометрическое 30
избыточное 30, 31
манометрическое 31
соотношение единиц измерения 31
Двуокись углерода 37, 38, 387
Декарбонизаторы 393—395
Депрессия температурная 458
Десорбция 402
Детандеры 48
адиабатический к. п. д. 57
классификация 337
назначение 337
поршневые см. Поршневые детандеры
степень расширения 337
турбодетандеры см. Турбодетандеры
Детонация масляных пленок 714
*Джоуля—Томсона* эффекты 49, 51
Диаграммы
$i - \lg p$ для азота 106
$i - \lg p$ для кислорода 106
$T - i$ 53
энтропийные $S - T$
для воздуха 44
для кислорода 47
Дисковые насадки 441, 442
Дистиллированная вода 524, 529
Дистиллят 135
Дифманометр мембранный 640, 641
Дифференциальный эффект см. *Джоуля—Томсона* эффекты
Дросселирование газа 49, 50
Дроссельные вентили 497 сл.
Дутье «тройное» 192
*Дьюара* сосуды 511—514

Едкий натр 388
Едкое кали 407, 533

Зависание жидкости в колоннах
предупреждение 600
признаки 599
причины 600
Запорные вентили 495, 496
Захлебывание колонны 467
Золотники 451

Измерительные диафрагмы 637, 638
Изобары 45, 53
Изоляционные материалы
вата
СТВ 481
минеральная 481
перлит 483
стекловолокно 482
Изоляция блоков разделения 480—48
Изотермические процессы 45
Изотермический коэффициент полезного действия компрессор 64
Изотермический эффект см. *Джоуля Томсона* эффекты
Изотермы 45



Изоэнтальпы 45
Изоэнтропийные процессы 45
Индивидуальная защита
от воспламенения одежды, насыщенной кислородом 728
от движущихся частей машин 729
от едкой щелочи 727
от паров растворителя и аммиака 728
от пыли минеральной ваты 727
от электрического тока 729
Инертные газы 23
Интегральный эффект см. *Джоуля—Томсона* эффекты

Калийное мыло 533
Каменная насадка 443, 478
*Капицы* цикл 79
Капрон 503
Картон асбестовый 488
Касторовое масло 533
*Кельвина*
градус 32
шкала 32
Кислород
автоматизация производства
автоматические регуляторы 683
блоков разделения 682
воздушных турбокомпрессоров 687
кислородных турбокомпрессоров, комплексная 690
графики регулирования режима детандеров при пуске блока разделения 615
жидкий 25
измерение влажности 661—665
контроль производства 635 сл.
медицинский газообразный 24, 25
медицинский жидкий 25
наполнение баллонов 566 сл.
осушка 424
потребители 142
применение 15 сл.
процесс получения 583 сл.
свойства 11 сл.
содержание в жидкости и паре 88
способы получения 13 сл.
схемы потоков при пуске установок 586, 607, 610, 611, 614, 619, 622, 627, 629
технический газообразный 24
технический жидкий 25
технологический 25
учет выработки 636
физические свойства 37, 38
хранение и сжатие 306 сл.
этапы технологического процесса 583
Кислородно-газификационная станция 564
Кислородный цех см. Воздухоразделительный цех
*Клайперона* уравнение 34
Клапаны 501, 502
Классификация масел по степени взрывоопасности 714
Клингерит 487
Комплексная очистка воздуха цеолитами
блок предварительного охлаждения воздуха 423
десорбция 421
изотермы адсорбции водяного пара 419
коэффициент адсорбции 418
режим работы цеолитовых блоков 412
схемы блоков очистки и осушки 422
техническая характеристика установок КО 422, 423
установка КО 422, 423
характеристика блоков очистки и осушки 420
холодильный агрегат АКФВ-6 423
цеолиты 418
циркуляционная регенерация блоков 421
Компрессоры поршневые см. Поршневые воздушные компрессоры, Поршневые кислородные компрессоры
Компримирование 50
Конденсатор(ы)
«обращенные» 457, 458
общий коэффициент теплопередачи 461
относительный уровень 460
пластинчаторебристого типа 461, 462
продукционный витого типа 460, 461
прямотрубный 459
ремонт 461, 463
«сухой» режим 458
техническая характеристика 463
установки УКГС-100 457
формула для расчета 461
Кремнегель 511
Криптон 27, 37, 38
коэффициенты сжимаемости 50
получение 263—267
Криптоновый концентрат, контроль содержания углеводородов 679, 680
Криптоно-ксеноновая смесь 27, 264
Критическая изотерма 53
Ксенон 28, 37, 38, 263—267

Лагометр 643, 644
Латунь с асбестовым шнуром 488
Линейное вредное пространство 271
Логарифмическая шкала 106
Лубрикатор 293, 300

Магнезия 512
*Мак-Кэба* и *Тиле* метод 135
Манганин 643
Масла
брайгсток 301
веретенное 354, 386
висциновое 386
взрывоопасность 714
индустриальные 299
касторовое 533
компрессорное 386
машинное 299
подсолнечное 533
предельное содержание
в жидком кислороде 710
в технологических потоках 709
расход, определение 715
теллур 714
трансформаторное 354, 386
турбинные 299
ХА фригус 354
хлопковое 533
энергия поджигания 714
Массообмен 94
Материал ПСБ 511
Материалы изоляционные см. Изоляционные материалы
Машины для расширения воздуха см. Детандеры
Машины для сжатия
воздуха см. Поршневые воздушные компрессоры и Турбокомпрессоры
кислорода см. Поршневые кислородные компрессоры
Медноаммиачный раствор 650
Медно-цинковый твердый припой 432
Медь М3 488
Международная практическая температурная шкала 32
Международная система единиц СИ 738, 739
Мероприятия по защите установок от взрыва 702 сл.
Мертвое пространство 271
Мертвый объем 271
Метан 37, 38
Механический эквивалент теплоты 42
Минеральная вата 481
Молекулярные сита 418
Моль 45
Моющие препараты 521
Мыльная эмульсия 533
Мягкие припои 432

Наполнение баллонов 566 сл.
Наполнительные рампы 568—572, 577 578
Насадка(и)
дисковые 441, 442
из колец Рашига 409
насыпная базальтовая (каменная) 443, 445, 478
Насосы для сжиженных газов
двухступенчатые 547—551
для газификации и нагнетания кислорода в баллоны 541, 542
для газификационных установок технические данные 553
конструкция 541 сл.
назначение 540
обслуживание 554
погружные 551, 552
поршневые (плунжерные) 540
расчет 555
сборка сальника 544
с вертикальным поршнем 540
с горизонтальным поршнем 540
с наклонным поршнем 540
со щелевым уплотнением поршня 545, 546
схема газификационной установки 548
технические данные 552
характеристика НЖК-11 547
центробежные 540
Неон 29, 37, 38, 269
Неоно-гелиевая смесь 29, 267, 269
Номограммы
*Герш* и *Цехановского* *T—p—i—x—y* 92, 106
*Лебедева* — равновесного состояния азото-кислородной смеси 91
*Ноэлля* формула 51

Обогащения коэффициент 97
Объемный коэффициент компрессора 271
Озон 37, 38
Окись углерода 37, 38
Оксиликвиты 12
Олеум 529
Оппозитный компрессор 287
Осушка воздуха
адсорбентами 407
адсорбционная 406 сл.
адсорбционный блок 408
блоки осушки
адсорбер 409, 411
двойной вентиль 410
запорный вентиль с шариковым клапаном 410
осушительный баллон 411
схема 411

Осушка воздуха
блоки осушки
техническая характеристика 415
фильтр керамический 412
электронагреватель азота 413
вымораживанием 417
изотермы адсорбции водяного пара 419
сорбенты 407
степень 415
цеолитами 418 сл., см. также Комплексная очистка воздуха цеолитами
эксплуатация аппаратуры 424—426
Охлаждающий эффект см. *Джоуля—Томсона* эффекты
Очистка воздуха
адсорбция 400- 403
аппарат каталитической очистки от ацетилена 701
блок разделения с вымораживанием и отмывкой $CO_2$ 404
вымораживание $CO_2$ 398, 406
вымораживатели 399
декарбонизаторы 393, 394
десорбция $CO_2$ 402, 403
изотермы адсорбции $CO_2$ силикагелем 402
комплексная цеолитами 418
коэффициент отклонения 400
недостатки химического способа 397
обслуживание аппаратуры щелочного способа 396, 397
от ацетилена см. Способы очистки воздуха от ацетилена
от двуокиси углерода 387 сл.
отмывка твердой $CO_2$ 403
от пыли 383 сл.
приготовление раствора едкого натра 395
растворы для поглощения $CO_2$ 396
регенерация силикагеля 402
скрубберы 388, 389
степень использования щелочного раствора 388
схема включения 390
техническая характеристика 391
схема каталитической очистки от ацетилена 700
физические способы 397 сл.
фильтры
безмасляные 386, 387
непрерывные самоочищающиеся ленные 384—385
рулонные 386
сетчатый цилиндрический 384
смачиваемые водноглицериновым раствором 386

Очистка воздуха
фильтры
сухие 386
ячейки (шторки) 384
ячейковые 384, 386
химический способ 388 сл.
щелочные насосы 292
Очистка и осушка воздуха см. Очистка воздуха, Осушка воздуха, Комплексная очистка воздуха цеолитами

Парализованный объем 271
Паронит 487, 488
Пенополиуретан 511
Перегрев жидкого кислорода 519
Перлит 483, 510
Петлевой воздух 192, 193
Петлевые клапаны 193
Петля тепловая 190, 191
Пограничные кривые 45
Подсолнечное масло 533
Пористая бронза 479, 480
Поршневой(ые) воздушный(ые) компрессор(ы)
антифрикционные материалы на основе фторопласта-4 291
вертикальный четырехступенчатый 2Р-3/220 282, 283
вредный объем (пространство) 271
горизонтальный многоступенчатый 5Э-14/220 284, 285
клапан(ы)
всасывающий 294
детали 294
комбинированный 294
нагнетательный 294
назначение 293
полосовой прямоточный 295
пружины 294
коленчатые валы и шатуны 288
коэффициенты 273
линейное вредное пространство 271
масляный насос высокого давления (лубрикатор) 300
мертвый объем (пространство) 271
многоступенчатые
марка (условное обозначение) 277
расход охлаждающей воды 297
технические характеристики 278—281
недогруз 306
неполадки 306 сл.
области применения 324
обслуживание во время работы 304, 305
одноступенчатые
двойного действия 273
индикаторная диаграмма 271
определение мощности 274

Поршневой(ые) воздушный(ые) компрессор(ы)
оппозитная схема расположения цилиндров 287
объемная производительность 272
объемный коэффициент 271, 272
парализованный объем 271
перегруз 306
повреждения 310
подготовка к пуску 303
подшипники 288, 289
полный объем 272
поршневые кольца
замок 290
из фторопласта-4
схема работы 291
типы 291
поршни 289
правила обслуживания 731
преимущества многоступенчатого сжатия 277
производительность по массе 272
пуск 304
ремонт
клапаны 319, 320
коленчатый вал и подшипники 314—316
обкатка 322
овальность и конусность шеек валов 314
общие сведения 312, 313
перезаливка вкладышей 314—316
цилиндры и поршни 317, 318
шатуны, штоки и сальники 318, 319
холодильники 321
сальники, смазка 293
сальник с чугунным и фторопластовыми кольцами 293
смазка
масла 299, 301
нормы подачи масла в цилиндры 302
централизованная 302
цилиндров 300
шатунно-кривошипного механизма 298
способы увеличения производительности 274
станины 287
степень сжатия 275, 276
стуки и способы их устранения 308, 309
схемы
горизонтального оппозитного 287
пятиступенчатого 5Г-14/220 276
угловые 284, 286
холодильники 295, 296

Поршневой(ые) воздушный(ые) компрессор(ы)
цилиндры 288
электродвигатели 297
Поршневой(ые) детандер(ы)
адиабатический коэффициент полезного действия 339
вертикальный ДВД-2 344, 345
весовой расход воздуха 340
горизонтальный ДВД-6 347—348
ДВД-12 350, 352
ДВД-13 351, 352
действительная индикаторная диаграмма 341
диаграмма наивыгоднейшего наполнения 342
защитные устройства 358, 359
индикаторные диаграммы 343
клапаны 355, 356
классификация 337
круговая диаграмма фаз распределения 338
масла для цилиндров 354
неполадки 364
обслуживание 363
остановка 363
пневматический лубрикатор 357
подготовка и пуск 362
поршневые уплотнения 354, 355
правила обслуживания 732, 733
рабочий процесс 338 сл.
расчетная индикаторная диаграмма 338
регулирование производительности 346
ремонт 365—367
сборка и испытание 368
смазка 357
смена и изготовление манжет 367, 368
схемы распределительных органов и смазки ДВД-6 348, 349
техническая характеристика 360, 361
типа 3а Д-18/40, 3аД-11/50, 3аД-6/200 353
удельная холодопроизводительность 339
фильтры 359
холодопроизводительность 340—342

Поршневой(ые) кислородный(ые) компрессор(ы)
аппарат для продувки 530, 531
вертикальный 2РК-1,5/200 522
водоуловитель 530
обезвоживание газообразного кислорода 532
обслуживание и ремонт 537—540
особенности конструкции 521

Поршневой(ые) кислородный(ые)
поршни 526
поршни и поршневые кольца 536
правила обслуживания 731
приготовление мыльной эмульсии 533
причины попадания масла 529, 531
с графитовыми кольцами 534
схема устройства для улавливания дистиллированной воды и кислорода 530
с эмульсионной смазкой 532, 533
техническая характеристика 527, 528
трехрядный КЗР-5/165 524, 525
Предельное содержание взрывоопасных примесей
в воздухе 154
в жидком кислороде 710
в технологических потоках 706
Предотвращение загрязнения воздуха маслом
определение минимального количества смазки 715
способы 715—720
установка маслослизывающих колец 718
фильтры 719
Припои
медно-цинковый твердый 432
мягкие 432, 472
Причины взрывов 693, 694
Продукты крекинга масла 714
Пропан 37, 38, 697
Пропилен 37, 38, 697
Противошумные тампоны 727

Разделение воздуха
воздухоразделительные аппараты см. Воздухоразделительные аппараты
организация производства 142 сл.
предельное содержание взрывоопасных примесей в перерабатываемом воздухе 154
себестоимость 143
схема процесса на металлургическом заводе 148
установки см. Воздухоразделительные установки
цех см. Воздухоразделительный цех
*Рашиги* кольца 409
Регенераторы
автоматические клапаны холодного конца 453, 454
азотной установки БР-5 441
базальтовая насадка, характеристика 445
высаживание $CO_2$ 439

Регенераторы
двухпоточный клапан 456
диск алюминиевой насадки 441
дисковые насадки 442
забивка насадки твердой $CO_2$ 443
изменение средней температуры по высоте 439
кислородной установки БР-5 441
клапанное устройство 447 сл.
механизм переключения клапанов 452
назначение 437, 438
переключающий клапан принудительного действия 448
периоды теплого и холодного дутья 439, 440
принцип действия 438, 439
с насадкой
базальтовой 443—447
дисковой алюминиевой насадкой 440—443
схемы
переключения клапанов 449
работы 438
техническая характеристика 445, 447
цельносварной (установки БР-14) 445, 446
цикловые диаграммы работы клапанов 450
характеристика с алюминиевой насадкой 445
Редкие газы 23, 27
контроль состава 665—670
криптон 27, 37, 38
криптоно-ксеноновая смесь 27
ксенон 28, 37, 38
неон особой чистоты 29
неоно-гелиевая смесь 29
схема распределения в колонне ректификации 252
температуры кипения 252
физические свойства 37, 38
Редуктор 508
Ректификационая(ые) колонна(ы) 92, 95
азотные 474
верхние 468, 470, 471, 473
зависание жидкости 599
захлебывание 467
количество тарелок 464
концентрационная секция 135
концентрация кислорода, аргона и азота в парах на тарелках 254
криптоновые 474
куб 465
насыпные 464
нижние 104, 464, 469, 473
определение числа «теоретических» тарелок 135 сл.

Ректификационная(ые) колонна(ы)
основные неполадки 472
отгонная секция 135
подвисание жидкости 467
схемы
движения жидкости на тарелках 99
материальных потоков в верхней колонне 135
распределения редких газов 252
сырого аргона 474
тарельчатые 464
тепловой баланс 127
технические данные 473
технического кислорода 474
унос жидкости 98, 99

Ректификационная(ые) тарелка(и) 95, 96 сл.
двухсливные 468
колпачковые 96, 466
кольцевые 465
коэффициенты
обогащения 97
эффективности разделительного действия 97
неравномерность работы 100
определение числа «теоретических» тарелок 135 сл.
ситчатая 96
сливной карман 465
сливные устройства 466, 467
S-образная 466
средний коэффициент полезного действия 97
схемы
движения жидкости 99
устройства 96
«теоретическая» 97
унос жидкости 98
фактическая 97
характер движения жидкости 99

Ректификация воздуха 92 сл.
аппараты 101—104
выход кислорода 108
двукратная 102—104
затраты энергии на разделение 87
массообмен 94
материальный баланс аппарата двукратной ректификации 106, 707
номограмма равновесного состояния азото-кислородной смеси 91, 92
однократная 100, 101
определение числа «теоретических» тарелок 135 сл.
расход воздуха 108
расчет параметров разделения воздуха 108 сл.



Ректификация воздуха
ректификационные колонны
Ректификационная колонна
состав азото-кислородной смеси
сущность процесса 94
схема многократного испарения конденсации жидкого воздуха 95
тепловой баланс аппарата двукратной ректификации 105
Реципиенты 508
Рулонные фильтры 386

Самоочищающиеся цепные фильтры 386
Сероуглерод, предельно допустимое содержание
в жидком кислороде 710
в технических потоках 708
Сетчатые цепные фильтры 386
Сжижение газов 35 сл.
Сжимаемости коэффициенты 48, 49
Силикагель 400, 407
Синтетические цеолиты 418
Скрубберы 388—391
Сопловой расходомер 639
Сосуды для сжиженных газов
*Дьюара* 511—514
изоляция
вакуумно-порошковая 509
высокий вакуум 508
вакуумно-экранированная, слоистая 509
теплоизоляционные материалы 509, 510, 512
обезжиривание 520, 521
перегрев жидкого кислорода 519
растворители для обезжиривания 520
стационарные 514, 515
транспортные 515—518
Сплавы
АМг-5 445, 472
АМц 430
АМцС 434
АД-1 434, 447
Способы очистки воздуха от ацетилена
адсорбция силикагелем
из воздуха в газовой фазе 699
из кубовой жидкости 698, 699
каталитический 700
цеолитами 699
Сроки обезжиривания блоков разделения 720
Сульфоуголь 529

Теллур 714
Температура 32
Температурная депрессия 458

Теоретическая тарелка 97
Тепловой баланс аппарата 127
Теплоемкость газов
массовая 40
объемная 40
удельная 39
Теплоизоляционные материалы 509—512
Теплообменник(и)
из гладких труб нержавеющей стали 433
из оребренных алюминиевых труб 433
классификация 127, 128
конденсаторы см. Конденсаторы
конструктивная характеристика витых 436
многосекционные 427
общий коэффициент теплопередачи 435
односекционные 427
пластинчатые 429, 430
поверхность теплообмена 435
поперечноточные 428, 430, 431, 432
принципиальные схемы 428
противоточные 55
прямотрубный (кожухотрубный) 427, 434
разность температур на тепловом конце 134
регенеративные 427
регенераторы см. Регенераторы
рекуперативные 427
с витыми трубками 427
скорость газа 435
схема распределения температур по длине 65
тепловая характеристика прямотрубных 436
техническая характеристика трубчатых 437
трубчатые 428
Теплообменные аппараты см. Теплообменники
Тепловая петля 190, 191
Теплосодержание см. Энтальпия
Термодинамика
второй закон 13, 14
первый закон 12, 13
Термодинамическая температурная шкала 32
Термометры
жидкостные 641
манометрические 645, 646
сопротивления 642, 643
Термопары 642
Тетрахлорэтилен 520
Точка росы 405
Транспортные резервуары 515—518
Трихлорэтилен 520, 721
Тройная точка воды 32
«Тройное» дутье 192
Трубопроводы
внутриблочные 484
газообразного кислорода 487
диаметр 492
классификация 484, 487
компенсаторы 487
назначение 484
материалы прокладок 488
межцеховые 484
надземные 485, 489
обезжиривание 490, 491
окраска 484
подземные 489
предельно допустимые скорости кислорода 492
ремонт 503, 504
схема обезжиривания 492
трубы 484, 485
уплотнения 487
фланцевые соединения 486
цеховые 484
Трубы 484, 485
Турбодетандеры 48
автоматизация 689
активно-реактивные
адиабатический к.п.д. 373, 378
рабочее колесо 372
расход воздуха 373
реакция газа 372
ТДР-19-6 375
активные
адиабатический к.п.д. 371
лопатки колеса 370
направляющий аппарат 370
парциальное регулирование 371
профиль лопаток 371
сопло 370
схема рабочего колеса 370
классификация 370
назначение 369
неполадки 381, 382
обслуживание 380
одноступенчатые центростремительные 370
остановка 382
подготовка к пуску 378
преимущества 369
пуск 380
регулирование холодопроизводительности 376—378
схема автоматической защиты от разноса 689
характеристика 379
Турбокомпрессорный агрегат 325, 326
Турбокомпрессоры
автоматизация 688, 689
агрегат 325, 326
внешняя характеристика 327, 328

Турбокомпрессоры
кислородные 329, 332
назначение 323
неполадки и способы их устранения 335
области применения 324
подготовка к пуску 333, 334
предупреждение загорания 725
производительность 327, 329
пуск и обслуживание 334—336
рабочее колесо 324
ротор 324
смазка 327
технические данные 330, 331

Указатели уровня
жидкостные 647, 648
мембранные 648—650
неисправности и способы устранения 649
Установки
воздухоразделительные см. Воздухоразделительные установки
газификационные 548, 558—560
Устройства для газификации жидкого кислорода 556 сл.

*Фаренгейта* шкала 33
Фибра 487
Фильтрация 480
Фланцы 486
Флегмовое отношение 136
Флегмовое число 136
Фибра 488
Фильтр-адсорбер 479
Фильтрующие элементы 479
Фреон-12 37, 38
Фторлон-4 291
Фторопласт-4 (фторлон-4, политетрафторэтилен) 291, 488

Хладоагент 58
Хлопковое масло 533
Хлорид кальция 407
Холодильные циклы см. Циклы холодильные
Холодопроизводительность 62
схема определения по диаграмме *S—T* 57
Хранилища 508

Центробежные компрессоры см. Турбокомпрессоры

Цеолиты 261, 407, 418
Цех разделения воздуха см. Воздухоразделительный цех
Циклы холодильные
высокого давления с поршневым детандером 77
идеальный 58
*Капицы* 79
низкого давления с турбодетандером 79 сл.
с дросселированием воздуха 60 сл.
с дросселированием и предварительным охлаждением воздуха 68 сл.
тепловой баланс 70
среднего давления с поршневым детандером 72

Четыреххлористый углерод
предельно допустимая концентрация в воздухе 721
свойства 721

Шкалы температурные
абсолютная 32
*Кельвина* 32
международная практическая 32
первичные постоянные точки 32
термодинамическая 32
*Фаренгейта* 33

Щелочная очистка воздуха 395, 396
Щелочные насосы 392

Электролиз воды 14
Электронагреватель азота 413
Электронный мост 643—645
Эмульсионная смазка 533, 540
Эмульсия 458
*Энглера* градусы 299
Энтальпия 42
Энтропийные диаграммы *S—T* 44, 47
Энтропия 44
Этан 37, 38
Этилен 37, 38
Эффекты Джоуля—Томсона 49
дифференциальный 51
интегральный 51
охлаждающий (изотермический) дросселирования 50, 51

Ячейковые фильтры 386

---

*Дмитрий Львович Глизманенко*

**Получение кислорода**