

ББК 31.31
Б88
УДК 621.59.01.001.92

Рецензент В. И. Епифанова

Бродянский В. М.

Б88 От твердой воды до жидкого гелия (история холода). – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 336 с.: ил. – (Научно-популярная б-ка школьника).

ISBN 5-283-00176-8

В популярной форме рассказывается об истории развития техники низких температур, ее использовании, а также связанных с ней направлений науки. Показано, как трудами изобретателей и исследователей разных стран были созданы многочисленные машины и приборы, без которых не могла бы существовать современная цивилизация.

Для широкого круга читателей, интересующихся историей техники, ее современными проблемами и перспективами развития.

Б 2210030000-023 Без объявл.
051(01) –95

ББК 31.31

ISBN 5-283-00176-8

© Автор, 19

ПРЕДИСЛОВИЕ

*Наука должна быть веселая,
увлекательная и простая.*

П. Капица

Эта книга посвящена одной теме – тому, как люди овладели искусством получать холод и использовать его для своих повседневных нужд и в научных поисках.

Название книги соответствует определению почти неизвестной тогда низкотемпературной области, которое дал М. В. Ломоносов еще два с половиной века назад: "Эта область начинается от самого низкого градуса теплоты, или, что то же, – от наибольшего градуса стужи, который пока еще никак не отмечен и не показан. Она оканчивается при температуре замерзания воды". Теперь этот "низкий градус", как и предвидел Ломоносов, "отмечен и показан". Сама же область, о которой он писал, превратилась в обширную рабочую площадку для науки, техники и технологии.

Выбор именно этой темы связан не только с профессиональными интересами автора и желанием привлечь молодежь к работе в области низких температур. Дело в том, что в истории науки и техники трудно найти другую область, где столь тесно переплетались бы физика и химия, биология и география, технология и быт, экономика и экология. Особенно тесно низкотемпературная техника связана с теплоэнергетикой, представляя собой в определенной степени ее опрокинутое зеркальное отображение, помогающее лучше, иногда с совсем неожиданной стороны, увидеть многие ее стороны.

Причиной, обусловившей обращение к технике низких температур как теме для научно-популярной книги, является и то, что в популярной литературе много пишут о физических открытиях, относящихся к низким температурам, а не менее интересная и важная инженерно-техническая сторона дела освещена очень слабо. Такой подход не позволяет дать более общую картину развития в любой области, включающей и ес-

тественные науки и технику. "За бортом" остаются и великие изобретения, которые не менее интересны и важны, чем открытия.

Представляется поэтому, что более верный путь для того, чтобы ввести читателя в мир низких температур, нужно прокладывать через технику и технологию – области более синтетические, чем любая отдельная наука, даже такая, как физика. Романтика и драматизм в инженерном поиске не менее интересны, чем в других областях творчества. Синтетический подход дает и большую возможность использовать сведения по истории и экономике. Это намного труднее, но зато получается более объемная, объективная картина развития событий.

Еще одна причина, подтолкнувшая к написанию этой книги, связана с тем, что до сих пор в литературе недостаточно полно освещен как вклад в развитие низкотемпературной техники научных работников и инженеров нашей страны (от М. Ломоносова до П. Капицы), так и исторические условия, в которых они работали.

Все эти соображения и вызвали появление предлагаемой читателю книги. Она построена на базе именно такого синтетического подхода. В нескольких местах по ходу изложения включены "научные комментарии" – разделы, в которых дается анализ некоторых понятий, терминов и методов, необходимых для более полного понимания материала книги. Они так же, как и остальной материал, изложены популярно, но требуют некоторой сосредоточенности. Читатели, которым эти разделы по тем или иным причинам окажутся ненужными или трудными, могут их пропустить (или изучить впоследствии). В ряде случаев уделялось внимание судьбам и личным качествам тех людей, которые сделали существенный вклад в низкотемпературные науку и технику.

Введение к книге посвящено предварительному ознакомлению читателя с тем, зачем нужен холод, какие потребности человека он может удовлетворять и в чем состояли основные трудности на длительном, измеряемом тысячелетиями пути овладения все более и более низкими температурами.

Глава первая знакомит читателя с многовековой историей холода, от доисторических времен до конца XVIII в. Она начинается с описания использования "естественного холода" – природных льда и снега и опытов с искусственными охлаждающими смесями. Уделено внимание создателям термомет-

рии, без работ которых были бы невозможны все дальнейшие исследования. Описаны и первые шаги в теории теплоты и холода, начиная с Ф. Бэкона и Дж. Блэка, завершаемые работами М. Ломоносова и А. Лавуазье.

Глава вторая охватывает период с начала XIX в. до 50–60-х годов, когда сформировались основные представления Первого и Второго начал термодинамики. В главу включен и первый "научный комментарий" – раздел о понятиях "тепло", "холод" и "охлаждение".

Глава третья тоже охватывает период первой половины XIX в. В ней рассказывается о первых холодильных машинах, позволивших не только отказаться от использования природного льда, но и получать его при необходимости искусственно в любых климатических условиях.

Заканчивается глава вторым "научным комментарием", посвященным анализу общего принципа получения низких температур.

Глава четвертая связана с событиями, происходившими во второй половине XIX и начале XX в. Она посвящена возникновению криогеники – области, охватывающей научные основы и технику получения температур, лежащих ниже 120 К, и связанной с ожижением и замораживанием таких газов, как кислород, азот, водород и гелий.

В главе пятой рассказывается о применении криогенной техники при использовании богатств атмосферы путем разделения воздуха. В нее включен третий "научный комментарий", относящийся к теории разделения смесей.

Глава шестая посвящена развитию и разнообразным приложениям холодильной техники.

Глава седьмая, как и следует из ее названия, содержит материал о современных научно-технических достижениях в низкотемпературной области. Здесь так же, как в гл. 2, 3 и 5, дается небольшой (и последний) "научный комментарий", относящийся к физике процессов охлаждения на смесях.

Глава восьмая знакомит читателя с драматической историей борьбы за одно из новых направлений низкотемпературной техники, связанное с работами акад. П. Л. Капицы. Два других раздела этой главы посвящены микрокриогенной технике и "холодному" космосу.

В главе девятой дан краткий обзор изложенного, позволяющий подвести итоги "истории холода" и наметить некоторые перспективы развития этого направления.

Естественно, что точно соблюсти хронологию событий, указанную в заголовках глав, на практике невозможно при всем желании: известно, что пути развития и науки и техники очень сложны и извилисты. Поэтому некоторые отклонения от последовательного по времени изложения не только неизбежны, но в ряде случаев и полезны. Они помогают показать реальную, а не схематизированную, "выправленную" историю.

Для читателей, желающих более основательно познакомиться с предметом, в конце книги дается краткая библиография.

Автор выражает большую признательность рецензенту книги проф. доктору техн. наук В.И. Епифановой за ценные замечания и советы.

Критические замечания и советы, относящиеся к содержанию и форме книги, будут приняты с благодарностью по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Низкий... (переносн.) ... малый, недостаточный, слабый, плохой, дурного качества.

Толковый словарь русского языка
под ред. И. Д. Ушакова

В технике, так же как и в других областях человеческой деятельности, представление о новом, прогрессивном чаще всего связано с понятием "высокий" – высокие скорости, высокие напряжения, высокое качество, высокий класс... Все это так. Однако, вопреки толковому словарю, и слово "низкий" часто звучит не хуже, а даже лучше, чем "высокий" (низкие цены, низкий уровень заболеваемости, радиации, преступности и т.п.). Применительно к температуре это слово тоже не может быть синонимом плохого; оно уже давно связывается с высшими достижениями в науке, технике и качестве жизни.

От какой точки начинается отсчет низких температур – официально не установлено; обычно к ним относят те, которые лежат в области ниже температуры окружающей среды, комфортной для человека, т.е. 20°C (по абсолютной шкале Кельвина 293 К)¹. Эта область температур, простирающаяся вплоть до абсолютного нуля (0 К или -273°C), обычно делится на две части. Верхняя, расположенная над условной границей 120 К (-153°C), используется в холодильной технике; нижняя, более труднодоступная, – в криогенной.

Слово "криогенный" было предложено известным голландским физиком и инженером Г. Камерлинг-Оннесом – одним из основоположников физики и техники низких температур. "Криос" по-гречески означает "холод", "холодный", а "генос" – "производить", "рождать", "генерировать".

¹ Подробно о температурной шкале Кельвина рассказано в гл. 2.

История завоевания человеком области низких температур насчитывает тысячелетия; однако проникнуть в самую труднодоступную ее часть, где господствуют криотемпературы, не существующие в земной природе¹, удалось только в середине прошлого века. На первый взгляд, это представляется странным. Действительно, кажется, что преодолеть каких-то 250–270 "холодных" градусов гораздо проще, чем те тысячи "теплых" градусов, которые человек перешагнул еще в незапамятные времена, научившись добывать огонь. Однако это не так: "теплые" и "холодные" градусы, несмотря на одинаковое значение на шкале термометра, качественно различны.

Чтобы повысить температуру тела, нужно сообщить ему энергию. Это можно сделать либо посредством затраты работы (например, трением или ударом), либо посредством реакции, высвободив химическую энергию (например, горением). Если же освободить ядерную энергию, то счет "теплых" (вернее, "горячих") градусов идет на миллионы. Нагреть же горячими продуктами реакции любой предмет – это уже дело более простое. Тепло всегда передается от более нагретого тела к менее нагретому. Человек владел обеими процедурами – и получением более нагретого тела (горячих газов), и передачей тепла к менее нагретому еще тогда, когда, например, поджаривал на костре кусок мамонта. Более того, огонь и высокая температура могут возникать и самопроизвольно, например при лесном пожаре.

Понизить температуру тела таким относительно простым путем невозможно. Действительно, чтобы это сделать, нужно отнять у него энергию. Но тепло само никогда не переходит от менее нагретого тела к более нагретому; нельзя вскипятить чайник, поставив его на лед. Казалось бы, самый простой выход из положения – тоже использовать для охлаждения передачу тепла от более теплого тела к более холодному. Но где взять что-либо более холодное, чем то, что имеется в окружающей среде?

Можно, например, взять (или привезти издалека) лед и использовать его; но таким путем все равно нельзя опуститься по температурной шкале ниже того уровня, который уже достигнут самой природой. Чтобы дальше снизить температуру,

¹ Самая низкая температура, зафиксированная на Земле в естественных условиях, составляет $-88,3^{\circ}\text{C}$ (станция "Восток" в Антарктиде, 1961 г.).

нужно "превзойти природу", которая "скупо дает нам холод", как писал великий английский философ и ученый Ф. Бэкон (1561–1626 гг.).

Проблема получения очень низких температур интересовала в то время не только ученых и философов. Она волновала и служителей церкви.

В 1621 г., еще при жизни Ф. Бэкона, вышла книга профессора Миланского университета Антонио Руски на актуальную тему – об аде. Он подошел к делу очень серьезно, проштудировав творения 300 (!) отцов церкви. Ад, по его мнению, находится в центре Земли, в царстве вечного огня; туда можно даже проникнуть через кратеры вулканов. Возникла только одна трудность: отцы церкви утверждали, что грешников пытаются не только огнем, но и страшным, пронизывающим холодом (не отсюда ли выражение "адский холод"). Но откуда берется холод в царстве вечного огня? Ведь огонь может лишь нагреть и испарить воду, но никак не заморозить ее!

Антонио Руски, в отличие от Ф. Бэкона, не стал ломать голову над тем, как получить из тепла холод. Он блестяще вышел из положения в чисто средневековом духе: "Бог, который создал огонь, в силах получить из него и мороз".

Способ охлаждения, с такой изящной простотой найденный миланским профессором, не помог в то время продвинуть вперед науку о холоде. Решить ее проблемы по-настоящему в полном объеме удалось лишь три века спустя. Среди них был найден и способ "получить холод из огня", Руски был не так уж неправ! Однако в XVII в. до этого было еще очень далеко.

С самых ранних времен стремление проникнуть в область низких температур определялось (как и в других областях) двумя побудительными мотивами. Первый из них – желание познать природу, объяснить, а потом и предсказать. Отсюда начинаются естественные науки. Второй – создать устройства, позволяющие использовать то, что может дать природа для нужд человека, улучшения условий его жизни. Отсюда рождаются техника и технология.

Применительно к теории, связанной с низкими температурами, предстояло сделать очень много: перенести с бытового уровня на научный такие понятия, как тепло, холод; ввести понятие о температуре; научиться их измерять; узнать, что происходит в телах при охлаждении, как меняются их свойства... и, наконец, главное – найти способы заставить веществ-

во понижать свою температуру "вопреки природе" (но в согласии с ее законами, которые тоже еще предстояло познать). Все это было далеко не так легко, как иногда представляется; только длительная и упорная работа многих и многих исследователей позволила найти и отстоять нужные ответы и решения.

Такой же трудный путь предстоял и создателям низкотемпературной техники. Только во второй половине XIX в. трудами многих изобретателей и инженеров были разработаны ее основы, позволившие в дальнейшем создать целую новую отрасль. На пути стояли многочисленные трудности как теоретического, так и практического характера, совершенно неизвестные ранее. Но так же, как и при создании научной базы, они были преодолены; мы теперь располагаем самыми удивительными творениями низкотемпературной техники, успешно работающими не только "на земле, в небесах и на море", но и даже в космосе и под землей.

Естественно, что достигнутый сегодня уровень — далеко не предел. И теперь, в конце XX в., работа во всех направлениях — и научном и техническом — продолжается; возникают и новые задачи, и новые решения, уходящие в XXI в.

С использованием холода положение несколько иное. Основные потребности в холоде были ясны с самого начала. Разумеется, что при этом далеко не все возможности использования низких температур могли проявиться. Большая их часть даже не могла и прийти в головы самых передовых людей не только в древности, но и в XVIII и даже в XIX в. Однако две главные, и до сих пор определяющие по масштабу применения возможности были ясны с незапамятных времен: охлаждение пищевых продуктов, напитков и создание по возможности сносных условий жизни при высокой внешней температуре (нечто похожее на то, что теперь называется кондиционированием воздуха). Разумеется, второе можно было реализовать для очень узкого привилегированного круга высшей знати, но тем не менее задача была поставлена (и решена). Постепенно круг применений низкотемпературной техники расширялся и к нашему времени стал почти необозрим. Здесь можно ограничиться лишь кратким перечислением некоторых его фрагментов.

Из охлаждения и замораживания пищевых продуктов родилась целая отрасль, включающая новые процессы — быстрое

замораживание, позволяющее сохранять продукты, в том числе фрукты и овощи, на длительный срок и восстанавливать их практически в свежем виде; сублимационная сушка, дающая порошки и пасты, превращающиеся при добавлении воды в полноценные продукты. Медики охлаждают и хранят плазму крови, биологические препараты, ткани и даже целые органы для пересадки, а иногда и охлаждают для сложных хирургических операций весь организм человека. Развилась даже целая отрасль медицины, совсем новая — криохирургия.

После того как удалось при криотемпературах оживить все газы, появилась специфическая отрасль промышленности — оживление газов и разделение газовых смесей для получения в жидком и газообразном виде кислорода, азота, аргона, неона, метана, гелия и других продуктов.

Эти продукты миллионами кубометров идут в металлургию, химию, машиностроение, ракетную технику и для использования в научных лабораториях.

В электротехнике понижение сопротивления металлов и сплавов, а в некоторых случаях его полное исчезновение (сверхпроводимость) позволяют создавать совершенно небывалые мощные устройства — накопители энергии, ускорители элементарных частиц и др. В радиотехнике и электронике, которые сами по себе еще молоды, появилось множество новых приборов и агрегатов, в которых используются низкие температуры. Без них, в частности, невозможна была бы спутниковая связь и дальнейшее телевидение. Этот перечень можно было бы еще долго продолжать, а если развернуть его подробно, не хватит не только этой относительно тонкой книги, но и нескольких толстых книг.

В дальнейшем изложении, которое относится в основном к истории получения холода, мы затронем по ходу дела лишь те его применения, описание которых поможет главной цели — рассказать об истории продвижения людей в области низких температур.

Начнем с самого начала, помня завет знаменитого немецкого философа Гегеля: "Чтобы знать предмет, надо знать историю предмета". Добавим к этому, что история любого предмета никогда не бывает менее интересной, чем сам предмет. А иногда и более...

Глава первая

ПРЕДЫСТОРИЯ ОСВОЕНИЯ ХОЛОДА (с древнейших времен до конца XVIII в.)

Образование холода — предмет
достойный изучения как с точки
зрения пользы, так и обнаружения
его причин.

Ф. Бэкон

1.1. "ЕСТЕСТВЕННОЕ" ОХЛАЖДЕНИЕ

На таежной реке Берелех, притоке Индигирки, экспедицией Якутского филиала Сибирского отделения Академии наук была обнаружена в вечной мерзлоте яма — своеобразный погреб, в котором находилась замороженная и хорошо сохранившаяся голень мамонта. Этот "холодильник" — самый древний из известных нам, был выкопан первобытным охотником.

На севере с незапамятных времен пользовались (и теперь пользуются) вечной мерзлотой для замораживания и хранения мяса, рыбы, жира и других продуктов. Там, где не было вечной мерзлоты, лед стали собирать зимой и хранить до лета в норах, вырытых в земле, пещерах или кучах, засыпанных землей сверху.

Более сложно было получить и сохранить холод в жарких странах, где вообще не было ни льда, ни снега. Только в горах, на большой высоте можно было их найти. Несмотря иногда на очень дальние расстояния — сотни километров, лед доставляли к потребителю. Сведения об этом, относящиеся к XI в. до н. э., можно найти даже в Библии (Ветхий завет, притчи Соломоновы, гл. 25, разд. 13). Александр Македонский во время Персидского похода (330 г. до н. э.) при осаде города Петры велел сделать 30 погребов со снегом, в которых хранилось охлажденное вино для его воинов.

Широко применялись привозимые из Альпийских гор снег и лед в древнем Риме и других городах, расположенных на

Аппенинском полуострове. Упоминания об этом встречаются не только у историков, но и у римских классиков — Сенеки, Марциала и Ювенала.

Плиний писал, что император Нерон приказывал охлаждать кипяченую воду, помещая сосуды с ней в снег. Менее привередливые потребители просто смешивали напитки со снегом. Применялись и охлажденные блюда, например студень. Увлечение холодными напитками и простудные заболевания, связанные с ними, были настолько распространены в античном мире, что знаменитый греческий врач Гиппократ (460—377 гг. до н. э.) должен был специально предупреждать об осторожности при их употреблении.

Дальше всех пошел в использовании снега римский император Гелиогабал (218—222 гг.). Он приказал насыпать в своем саду большие горы из снега, чтобы ветер в жаркую погоду разносил прохладу. Таким образом, Гелиогабал успел первым придумать и реализовать на практике (и в довольно широком масштабе) кондиционирование воздуха; к этой идее вернулись только через 500 лет (в XIX в.), да и то лишь в закрытых помещениях.

В средневековые использование льда, переводимого на далекие расстояния, сохранилось, несмотря на связанные с такой операцией трудности. Арабские халифы в Дамаске и Каире всячески этому способствовали. Халиф Махди (775—785 гг.) организовал регулярную доставку на верблюдах льда из Ливана и даже гор Армении в Мекку. Один из его наследников усовершенствовал (сам, или по совету ученых консультантов) кондиционирование своей летней резиденции, поместив лед между двойными стенками. Это гораздо более экономный метод, чем использованный ранее Гелиогабалом.

Персидский путешественник Насири Хосров писал (1040 г.), что на султанскую кухню в Каире ежедневно прибывали 40 верблюдов, груженных льдом, и что для этого была устроена специальная скоростная транспортная служба по дороге от Сирии до Египта с нужным числом промежуточных станций.

Многие, наверно, помнят и описанный Вальтером Скоттом эпизод Первого крестового похода (1190 г.), когда султан Саладин переслал своему противнику — заболевшему королю Ричарду I (Ричарду Львиное Сердце) охлажденный льдом шербет. Для этого он велел специально послать караван в горы за льдом. Этот красивый жест не только подтверждает рыцарс-

кое благородство Саладдина, но и то, что "холодильные" древние традиции и в средневековье не были утрачены арабами. Интересно, что для уменьшения потерь от таяния при перевозке льда и снега арабы придумали специальные деревянные ящики: промежуток между стенками заполнялся войлоком. Это были, по существу, первые образцы низкотемпературной тепловой изоляции. Не менее интересный факт "холодильной галантности" можно привести и из европейской истории. Когда Людовик XIV осаждал Лилль в 1667 г., командующий осажденным гарнизоном услышал, что французы не имеют льда; он послал через укрепления гонца со льдом и посланием, что осада продолжается много месяцев и он не может себе представить, как король обходится без льда. В это время придворные в Версале требовали пять фунтов льда в день на каждого в течение всего лета. Лед не привозили издалека, а добывали на месте зимой и хранили его запас в погребах до осени.

Многие столетия и в дальнейшем природный лед оставался основой для получения холода в теплое время года во всех странах, где можно было создать его запасы. Лед не потерял своего значения, несмотря на последующую эволюцию в области средств охлаждения.

В наше время использование природного льда под давлением мощной конкуренции со стороны совершенной холодильной техники почти сошло на нет. Тем не менее в странах, где зимой много льда, древняя технология еще живет и даже расширяется. В этом нет ничего удивительного: добывание, хранение и использование природного льда дешевле, а главное – экологически практически безвредно. Разумеется, речь может идти только об очень узком интервале температур, используемых в холодильной технике, близких к температуре окружающей среды.

Почти параллельно с "пассивным" использованием зародилось новое направление в получении холода, которое можно назвать "активным". Оно основывалось на необходимости "превзойти природу", добыть холод искусственно. Из первых удачных решений путем длительной эволюции и родилась через много столетий современная низкотемпературная техника.

1.2. ПЕРВЫЕ ШАГИ "ИСКУССТВЕННОГО" ОХЛАЖДЕНИЯ

Доставка снега и льда на далекие расстояния была слишком дорогим удовольствием, доступным лишь очень узкому кругу высшей аристократии. Более важной, особенно в жарких странах, была нужда просто в охлажденной воде, которую можно было бы получать на месте и без больших затрат. Для этого не годился пассивный способ охлаждения внешним, более холодным телом; такого тела просто не было. Нужно было придумать другой, активный способ охлаждения – без применения снега или льда. И такой способ был придуман. Идея его состояла в том, чтобы заставить саму воду себя охлаждать! И это сделали древние египтяне еще за 2500 лет до н.э. На сохранившихся с того времени фресках изображены рабы, которые большими веерами обмахивали сосуды с питьевой водой (рис. 1.1). Очевидно, что таким способом, используя для этого обычные кувшины, нельзя получить воду, более холодную, чем окружающий теплый воздух. Однако гениальная, в полном смысле этого слова, мысль состояла в том, чтобы сделать сосуды пористыми. Часть воды, просачиваясь через поры, испарялась на поверхности кувшинов, охлаждая ее; обдувание сухим воздухом интенсифицировало этот процесс. В результате оставшаяся в сосудах вода охлаждалась на 10–15°C ниже начальной температуры. Идея этого способа родилась, по-видимому, из повседневного опыта: увлажненная поверхность тела на ветре охлаждается.

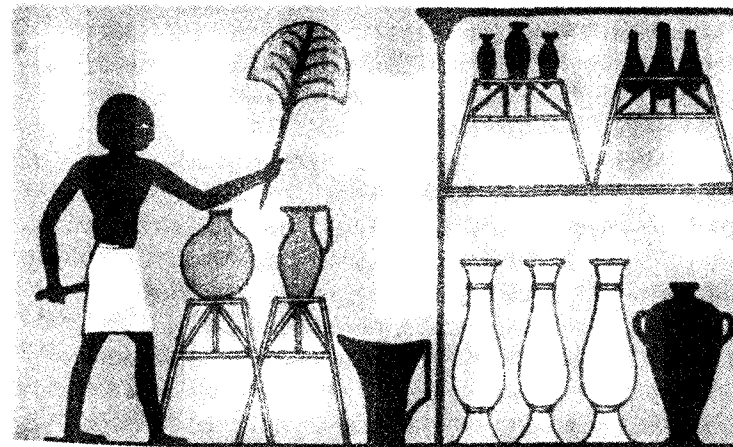


Рис. 1.1. Охлаждение воды испарительным способом в Древнем Египте

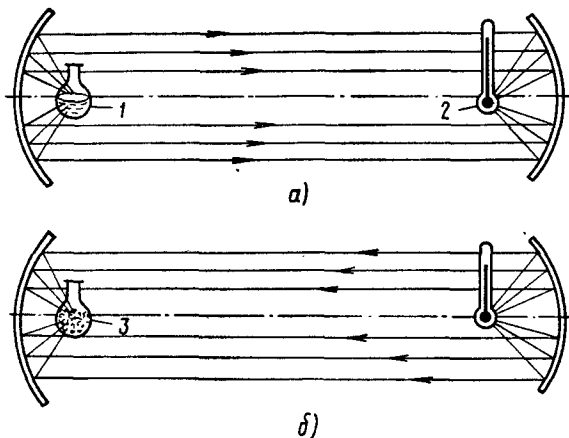


Рис. 1.2. Опыт М. Пикте:

1 — сосуд с кипящей водой; 2 — термометр; 3 — сосуд со льдом

В Индии с незапамятных времен и вплоть до прошлого века тоже использовалось испарительное охлаждение, но в сочетании с другим процессом, делавшим его еще эффективнее. Плоские керамические открытые сосуды, напоминающие по форме большие сковороды, наполнялись водой и помещались на соломенных подстилках, уложенных на дне неглубоких траншей, вырытых в грунте. В ночное время при ясном небе вода в плоских сосудах настолько охлаждалась, что иногда покрывалась коркой льда. Частично охлаждение объяснялось испарением воды, но главная причина была в другом — тепловом излучении с поверхности воды.

Сейчас трудно сказать, как объясняли столь сильное охлаждение воды древние изобретатели этого способа.

Научным исследованием теплового излучения начали заниматься только в XVIII в.; первыми были члены знаменитой флорентийской "Академии опытов". Более основательное исследование провел швейцарский профессор М. Пикте (1740 г.). Схемы его опытов показаны на рис. 1.2. Использовались два металлических вогнутых зеркала, установленных одно напротив другого. В фокусе первого зеркала (рис. 1.2, а) помещался сосуд с горячей водой. Тогда термометр, установленный в фокусе второго зеркала, показывал *повышение* температуры по срав-

нению с температурой окружающей среды. Если же поместить в фокус первого зеркала сосуд с кусками льда (рис. 1.2, б) (что было сделано по совету математика Бертрана), то термометр показывал температуру *ниже*, чем в окружающей среде. Раньше такие эффекты объясняли действием в первом случае теплых (калористических — от латинского слова *calore*) лучей, а во втором — холодных (фригорических — от латинского слова *frigore*). Такое объяснение шло в русле положения, идущего еще от Аристотеля, о существовании неких "теплого" и "холодного" начал, могущих смешиваться в разных соотношениях.

Однако Пикте преодолел груз этих представлений и впервые нашел правильное объяснение. То, что он назвал "тепловой эманацией" (т.е. энергия, передаваемая излучением), всегда идет от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой.

На рис. 1.2, б таким более теплым телом служит шарик термометра, а более холодным — лед. Поэтому термометр охлаждается, а лед тает. Необходимость в двух началах — теплом и холодном, таким образом, отпала.

В "индийском варианте" охлаждения излучение сравнительно теплой воды уносит намного больше энергии, чем дает ей излучение холодного ясного ночного неба. Поэтому вода охлаждается так интенсивно.

Достижения в области охлаждения воды испарением через стенки пористых сосудов были забыты после падения античной цивилизации. Только в средние века с помощью арабов эти "холодильные чудеса" попали в Испанию и Португалию. Здесь широко распространились пористые сосуды для охлаждения воды, называемые "алькарацца". Затем они проникли дальше в Европу, прежде всего во Францию, где стали известны во времена Франциска I (1494–1547 гг.).

Развитие испарительного охлаждения тогда остановилось на сугубо практическом уровне. Никто в то время не мог предполагать, что в будущем, после целой серии научных исследований в XVII и XVIII вв., оно обеспечит базу для создания одного из основных направлений низкотемпературной техники XIX и XX вв. (см. гл. 2).

Несколько позже, чем испарительное охлаждение, был изобретен и другой способ охлаждения — посредством смешения (точнее его можно было бы назвать растворением). Первое

краткое упоминание об открытии, лежащем в его основе, со-
держится в индийской рукописи "Панкатантрам", датируемой
IV в. до н.э. Оно гласит: "Вода охлаждается, если в нее добавля-
ется соль". Основанный на этом методе способ получения льда
описан арабским писателем Ибн-Аби-Усабия (1203–1269 гг.).

К XVI в. в Европе было уже широко известно применение
растворения селитры в воде для охлаждения напитков. В част-
ности, охлажденной таким способом водой поили рабов-гребцов
на галерах. В 1550 г. вышло даже специальное научное сочине-
ние испанского врача Блазиуса Виллафранка. Это, пожалуй,
первое из известных практических руководств по холодильной
технике. Оно, как и полагалось в то время, было написано на
латинском языке и имело, как тогда было принято, длинное
название, из которого для нас важны первые два слова:
"Methodus refrigerandi" (методы охлаждения). В нем, в частнос-
ти, сказано, что такой способ охлаждения воды и вина широко
известен и применяется горожанами в домашнем хозяйстве.

Вскоре был сделан и следующий шаг: было установлено,
что смешение селитры со снегом позволяет получать значи-
тельно более низкие температуры. Впервые этот способ был
описан в труде неаполитанца Баптисто Порты "Mada Naturalis"
(1589 г.). Неаполитанский врач Латинус Танкредус писал
(1607 г.) о быстром замораживании воды в сосуде, помещенном
в такую смесь.

Охлаждающие смеси и в дальнейшем сыграли существен-
ную роль в развитии исследований в области низкотемператур-
ной физики и техники. По существу, они вплоть до середины
XIX в. оставались основным средством охлаждения в экспери-
ментальных работах.

В быту они использовались еще долгое время. Еще в 20-е
годы нашего века в Москве и других городах готовили и про-
давали мороженое в бачках, помещенных в ящики с соленым
льдом. Так же замораживались и хранились многие пищевые
продукты.

Вернемся, однако, к истории.

Очень серьезно занимался проблемами низких температур
знаменитый философ, естествоиспытатель и политический
деятель Фрэнсис Бэкон (1561–1626 гг.) – основоположник совре-
менной эмпирической науки. При всем разнообразии занятий
этот удивительно разносторонний гений эпохи Возрождения
постоянно обращался к теме о холоде. Он часто и в разных

сочинениях обсуждал с различных сторон природу холода и
несовершенство известных методов его получения. Так, в
"Естественной истории", в разделе, называвшемся "Экспери-
менты, касающиеся производства холода", он писал: "Теп-
ло и холод – две руки природы, посредством которых она творит;
тепло мы имеет уже готовым в виде огня; что касается холода,
то мы должны ждать его прихода, либо искать его в глубо-
ких пещерах или высоких горах; и когда мы сделаем все, что
в наших силах, мы все же не можем получить его в желаемой
степени, ибо огонь очага греет сильнее, чем летнее солнце,
но погреба и вершины гор не холоднее, чем зимние морозы".

Этот знаменитый отрывок, который многократно впоследст-
вии цитировался и более или менее удачно комментировал-
ся, не единственное место в работах Бэкона, посвященное хо-
лоду. Всю жизнь он не расставался надолго с этой темой. Осо-
бое внимание он отдавал охлаждающим смесям и их ис-
пользованию. В той же "Естественной истории" назван целый
ряд различных охлаждающих смесей. Даже в последние дни
жизни он проводил эксперименты по замораживанию мяса
курицы, собственноручно обкладывая ее снегом. Простудное
заболевание, полученное при этом, способствовало его
смерти.

Ф. Бэкон подвел итоги всему, что было достигнуто к его вре-
мени в области получения холода и попыток осмыслить его
природу. Вместе с тем он показал направление, в котором дол-
жен быть проложен дальнейший путь исследований в этой
области.

Отметим прежде всего, что Бэкон впервые четко отметил
еще необъясненную асимметрию обеих "рук природы" – "теп-
лой" и "холодной", придав ей фундаментальное значение.
Тепло, причем сильное, получается легко, а холод, даже неболь-
шой, – получить непросто: природа "с трудом дает его нам".
Ведь по теории Аристотеля, которая еще господствовала в его
время, тепловое состояние тел описывалось "температурой",
определяемой как мера соотношения двух равноправных на-
чал, перемешанных в теле, – теплого и холодного. С этих пози-
ций трудно объяснить, почему в одну сторону – теплую, можно
двигаться далеко и легко, а в другую – холодную, удается про-
двинуться очень мало и с колоссальными трудностями.

Подчеркивая этот факт, Бэкон, по существу, нанес первый
удар по объяснению Аристотеля. Поиски после этого пошли

в направлении нахождения единой причины тепла и холода, а не двух начал (несмотря на то что природа, по образному выражению Бэкона, "действует двумя руками"). Более того, Бэкон четко высказал и свой взгляд на природу тепла: "тепло есть движение малых частиц тела". Это было первое в новое время постулирование основ корпускулярной теории тепловых явлений.

Поиски теории, позволяющей объяснить все множество тепловых явлений, продолжались еще три века после Бэкона. Они шли по очень извилистому и трудному пути. Естественно, что они были связаны с изучением как нагревания, так и охлаждения; теория должна была тем самым выявить их общность. Непременным предварительным условием для этого было уточнение понятий "температура", "тепло" и "холод" и связей между ними. Для этого прежде всего нужно было научиться их измерять.

1.3. ТЕРМОМЕТРИЯ И ТЕПЛО

К началу XVII в. в науке о холоде и тепле накопился солидный экспериментальный материал. Сформировались и взгляды на то, что нужно было понять, чтобы двигаться дальше. Однако такое движение оказалось невозможным без того, чтобы ввести какие-то количественные оценки в результаты экспериментов; только тогда их можно было бы осмыслить, опираясь на твердую почву. Это уже хорошо понимали во времена Ф. Бэкона. До этого на протяжении многих веков тепло и холод ассоциировались у людей лишь с повседневными ощущениями.

Первым, насколько известно, кто попытался перейти к более объективным показателям теплового состояния тел, был еще Филон Александрийский (I-II вв. н.э.). В своем сочинении "Механика" он описал прибор для тепловых измерений — термоскоп, состоящий из двух связанных трубкой сферических сосудов. Сосуд 1 частично заполнен водой, а остальное пространство занято воздухом (рис. 1.3). Сосуд 2 полностью заполнен воздухом. Если освещать сосуд 2 солнцем, то воздух из него по трубке переходил в сосуд 1, что можно было наблюдать по пузырькам, выходящим из трубки. Если, напротив, поместить сосуд 2 в тень, то вода поднималась по трубке и частично переливалась в него из сосуда 1. Таким образом, Филон не толь-

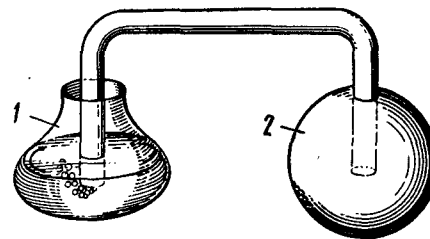


Рис. 1.3. Термоскоп Филона Александрийского

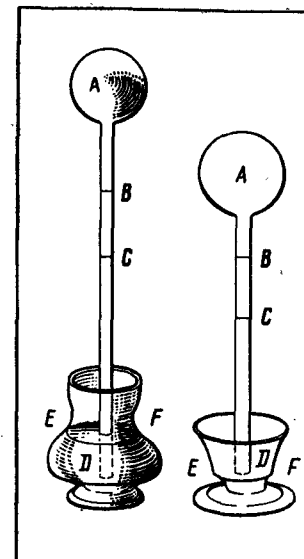


Рис. 1.4. Термоскоп Галилея (рисунок XVII в.)

ко заново открыл и показал расширение воздуха при нагревании (это было известно еще египетским жрецам), но и создал прибор, позволяющий судить о повышении или понижении температуры.

Прошло много лет, пока Г. Галилей не повторил опыт Филона (1597 г., Пиза). Прибор, который он демонстрировал на лекциях, показан на рис. 1.4. Принципиально он ничем не отличается от своего прототипа (это иногда служило даже поводом для дискуссий о приоритете). Так же, как и прибор Филона, "термоскоп" Галилея не имел шкалы, и его показания носили чисто качественный характер; кроме этого, на них могли отражаться и колебания атмосферного давления (об этом, правда, в то время ничего не было известно, так как работы ученика Галилея — Торичелли по изучению атмосферного давления еще были впереди). Тем не менее первый шаг в термометрии нового времени был сделан.

В дальнейшем прибор Галилея был существенно улучшен членами флорентийской "Академии опытов". Они снабдили его шкалой (из бусин одинакового размера, припаянных к трубке) и удалили воздух из резервуара и трубки. Тем самым влияние атмосферного давления исключалось. Хотя они и не присвоили точкам шкалы определенных числовых значений, им удалось установить постоянство точки плавления льда. При

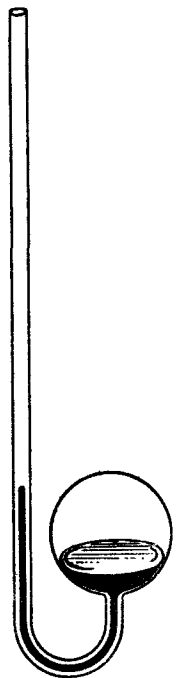


Рис. 1.5. Термометр Амонтона

любых условиях она соответствовала одной и той же точке шкалы.

Первые попытки зафиксировать определенные реперные точки термометрической шкалы предпринимались несколькими исследователями. Среди них следует отметить Отто фон Герике (1602–1686 гг.) – знаменитого бургомистра Магдебурга, с научными достижениями которого мы еще не раз встретимся. Он четко осознавал необходимость иметь две точки на шкале, чтобы разбить интервал между ними на определенное число делений (градусов) и продолжить деления, в случае необходимости, и за пределы этих двух точек. Но выбор их, сделанный Герике, хотя и диктовался, по-видимому, патристическими соображениями, был не очень удачен. Нижняя точка – средняя температура заморозков в Магдебурге, а верхняя – летняя температура в этом же городе. И та и другая точки – очень размытые; но все же у Герике получился уже не термоскоп, а термометр, хотя еще и несовершенный. О. Герике разместил свои термометры на наружной стене собственного дома для пользы горожан Магдебурга.

Самый существенный шаг в развитии термометрии сделал француз Гийом Амонтон (1663–1703 гг.). Он сконструировал воздушный термометр, показанный на рис. 1.5, который уже очень похож на современный газовый. Трубка U-образной формы с полым шариком на одном колене заполнена ртутью, как показано на рисунке. В зависимости от температуры воздуха в шаровом сосуде ртуть занимает то или иное положение.

Заслуги Амонтона состоят не только в создании более совершенного термометра. Он много сделал для развития учения о тепловых явлениях. Он был первым, кто совершенно ясно высказал убеждение, что термометр измеряет не количество тепла, а степень нагретости тела – температуру. Таким образом, был сделан решающий шаг, позволивший четко разделить понятия "тепло" и "температура". Этим открывалась дорога для самостоятельного изучения физической природы каждого из них. Об том речь пойдет дальше, а пока нужно вернуться к термометрии.

Г. Амонтон, задолго до открытия Гей-Люссаком закона температурного расширения газов, утверждал, что расширение газа происходит одинаково по всей температурной шкале, которая должна быть линейной. Оставалось сделать завершающий шаг – выбрать надежные неизменные универсальные точки для температурной шкалы. Гюйгенс писал по этому поводу в 1655 г.: "Тогда не надо будет посылать термометр из одного места в другое, чтобы сравнить наблюдаемую степень тепла". Р. Бойль в 1665 г. в труде "Механические начала тепла" уже высказал твердое убеждение, что точки плавления всех тел постоянны; Р. Гук тоже считал постоянными точки плавления льда и кипения воды. Тем не менее И. Ньютон, предложивший свою конструкцию термометра с льняным маслом в качестве термометрического тела (т.е. заменивший газ жидкостью, что до него уже сделали во Флоренции), использовал только одну строго фиксированную точку – температуру таяния льда, которую он принял за 0°C . За вторую точку шкалы он взял температуру человеческого тела, придав ей значение 12°C . Выбор этой, на первый взгляд, странной системы имеет объяснение. Цифра 12 в средневековой медицине имела глубокий смысл. Каждое качество человека, связанное с "соками" организма (например, кровью, желчью) могло быть выражено в большей или меньшей степени. Эти степени оценивались в градусах, максимальное число которых было четыре, а каждый градус делился на три ступени. Таким образом, шкала каждого качества имела 12 ступеней. Вообще, цифра 12 ("дюжина"), которая делится на два, три и четыре, была в античности и средневековье очень популярна. Ведь апостолов Христа было тоже 12!

Термометры, по своему устройству ничем уже не отличающиеся от современных, создал впервые Габриэль Фаренгейт (1686–1736 гг.). Он изготовлял ртутные и спиртовые термометры весьма высокого класса; при этом подошел к делу очень основательно. Достаточно сказать, что им был разработан специальный метод очистки ртути, а перед запаиванием термометрической трубки он кипятил жидкость, удаляя таким образом из нее воздух. Но для термометрической шкалы Фаренгейт, подобно Ньютону, выбрал тот же "полужесткий" вариант, с опорой только на одну строго фиксированную точку – температуру таяния льда; он дал ей значение 32° . Вторая точка – 96° соответствовала температуре тела здорового человека, пред-

ставление о которой может быть разным. Все дело в том, куда сунуть термометр: если его поместить в рот (как делают в США), то температура будет 98,5°F, а если под мышку, то 98°F. Получилась несколько своеобразная шкала (ее градусы по имени изобретателя обозначаются буквой "F"), на которой 212°F соответствуют температуре кипения воды. Шкала Фаренгейта до сих пор широко используется в англоязычных странах.

В те же 20-е годы занимался разработкой ртутных термометров петербургский академик Ж. Делиль, основатель астрономической обсерватории в здании Кунсткамеры на Васильевском острове. Термометры Делиля были основательными и надежными приборами; ими пользовались в России многие исследователи, в частности Ломоносов и Рихман. Шкала Делиля была расположена между двумя фиксированными точками – температурами кипения воды и таяния льда. Первой соответствовал 0°, второй – 150°.

Француз Рене Реомюр (1688–1757 гг.) не одобрял применение ртути в термометрах из-за ее сравнительно низкого коэффициента расширения и предпочитал спирт. Поскольку эта жидкость расширяется между температурами таяния льда и кипения воды в отношении 1000:1080, он предложил шкалу на этом отрезке разделить на 80 частей. Через 12 лет, в 1730 г., Цельсий (1701–1744 гг.) разделил этот же интервал на 100 частей, но принял за 100°C температуру таяния льда, а за 0°C – температуру кипения воды. Таким образом, он сделал такую же "перевернутую" шкалу, как и Делиль, но разделил ее иначе, взяв более удобное число градусов.

Возникает естественный вопрос – почему и Делиль, и Цельсий поставили шкалу "вверх тормашками"? Ведь не может быть, что у них не было каких-то соображений на этот счет! Действительно, и тот и другой заложили в построение шкалы определенную идею: она заключалась в том, чтобы при измерении низких температур избежать отрицательных значений градусов. Чем больше мороз, тем больше термометр показывал градусов холода.

Как будут считать градусы выше точки кипения воды – ученых того времени особенно не волновало, поскольку задачи такого рода еще не возникали. Напротив, температуры, лежащие ниже точки замерзания воды, встречались и в природе зимой, и уже создавались искусственно посредством охлаждающих смесей. Наконец в 1750 г. Штремер все же "перевернул"

шкалу Цельсия, и она приняла современный вид. Однако наименование "градус Цельсия" осталось.

Интересно отметить, что знаменитый шведский ботаник Карл Линней, создатель основ классификации растений, тоже занимался совершенствованием температурной шкалы. Он предложил еще раньше Цельсия (в 1738 г.) стоградусную шкалу, где 0°C соответствовал температуре таяния льда, а 100°C – температуре кипения воды. Однако его идея не привлекла внимания физиков, и шкала температур "кувыркалась" еще ряд лет, пока не вернулась в нужное положение. Таким образом, "по совести", шкала Цельсия должна была бы называться "шкалой Линнея".

С середины XVIII в. термометр прочно вошел в арсенал физических исследований, а затем стал широко использоваться и в быту – для измерения температуры в помещениях и на улице, а также в медицине. Вместе с тем физическое содержание понятия "температура" оставалось нечетким. Это и неудивительно: ответить на вопрос о том, что такое температура, можно было только в том случае, если будет уяснен смысл понятия "тепло" (а исходя из этого и "холод").

В этом отношении XVII и особенно XVIII в. дали очень много: была подготовлена база для того, чтобы в следующем, XIX в., ответить на вопрос окончательно.

В начале XVII в. о природе тепловых явлений по существу ничего не было известно. Теория Аристотеля о смеси теплого и холодного начал ("температуре") уже изжила себя. Г. Галилей заменил ее предположением о существовании одной невесомой тепловой материи (от латинского слова *calor*, получившего в русской терминологии название "теплород"). Эта материя обладает способностью перетекать от одного тела к другому. Чем больше ее содержание в теле, тем сильнее оно нагрето, и наоборот – чем меньше, тем оно холоднее. Понятие о "холодном" начале при таком объяснении уже стало ненужным.

Почти одновременно с Г. Галилеем и Ф. Бэкон в одном из основных своих трудов – знаменитом "Новом органоне", выдвинул другую теорию тепловых явлений – корпускулярную. Рассуждения по этому поводу на основе ряда проведенных им опытов привели его к выводу, что тепловое состояние тела определяется движением некоторых малых невидимых частей тел – корпускул. И та и другая точки зрения были лишь гениальными догадками, а не теориями с серьезными

экспериментальными обоснованиями и количественным анализом.

В дальнейшем борьба между сторонниками этих воззрений, идущих от Галилея и Бэкона¹, продолжалась более 200 лет; в ходе ее были получены важные результаты, одним из которых было окончательное разделение понятий "температура" и "тепло".

Если говорить о разделах науки, связанных с теплом, то после этого разделения вплоть до 20-х годов и даже середины XIX в. они развивались хотя и быстро, но в ограниченных рамках калориметрии, теоретической базой которой служила вещественная теория теплоты или теория "теплорода"². Другими словами, изучались и измерялись лишь явления, связанные с переходом тепла (теплорода) между телами, но без всякой связи с другими формами энергии или ее преобразованиями.

При этом техника значительно опередила науку – паровые машины, преобразовывающие теплоту в работу, не только были созданы, но и постоянно совершенствовались. Но это совершенствование проводилось тогда методом проб и ошибок или, иногда, посредством исследований прикладного характера. Дальше мы увидим, что и создание холодильных установок шло вначале таким же путем.

Тем не менее очень многое было сделано и в теории, и в части накопления экспериментального материала. Здесь очень большую роль сыграли работы друга Ломоносова – петербургского академика Г. Рихмана, а затем Д. Блэка. Д. Блэк ввел понятия "теплоемкость" и "скрытая теплота" (плавления и кипения) и тем самым окончательно разделил понятия "теп-

¹ Если копнуть историю глубже, то можно увидеть, что корни обоих подходов уходят еще к античным философам. Корпускулярная теория обсуждалась еще греческими атомистами (Демокритом и др.) и была очень наглядно отражена в знаменитой поэме Лукреция Кара "О природе вещей". Положение о невидимых флюидах (началах) еще до Аристотеля выдвигали пифагорейцы.

² Термин "теплород" ввел в русскую научную литературу М. В. Ломоносов при переводе одного из разделов книги своего учителя Х. Вольфа. Переведенный им шестой раздел книги был назван им "Вольфианская экспериментальная физика". Перевод Ломоносова стал первым учебником физики на русском языке. Исходный латинский термин "calor" – отсюда появились "калориметрия", "калория" и др.

ло" и "температура". Оказалось, что при неизменной температуре можно как сообщать телу тепло, так и отводить его.

К концу XVIII в. сложилось положение, когда обе теории теплоты – и вещественная, и корпускулярная – существовали одновременно. Первую отстаивали и развивали после Г. Галилея Х. Вольф, Д. Блэк, А. Кроуфорд, Ж. Фурье, вторую – И. Ньютон, Д. Локк, Т. Гоббс, Р. Гук, Д. Бернулли, Б. Румфорд, Л. Эйлер, Г. Крафт, М. Ломоносов, Г. Рихман, сначала придерживавшийся вещественной теории, позже перешел на сторону М. Ломоносова. Однако преимущество все же было за вещественной теорией, которая хорошо объясняла все калорические опыты, связанные с нагревом и охлаждением тел и теплопередачей: количества теплоты ("теплорода") оставались при всех опытах неизменными.

Корпускулярная теория уступала ей в том, что носила качественный характер и не могла дать базу для количественных тепловых расчетов; тем не менее факты, свидетельствующие в ее пользу, накапливались. Важнейшими из них были знаменитые опыты графа Б. Румфорда с выделением тепла при сверлении пушек (1798 г.), необъяснимого (даже с натяжками) на основе теории теплорода. Наиболее отчетливо вся ситуация с теорией тепловых явлений была отражена в работах А. Лавуазье и П. Лапласа, относящихся к 90-м годам XVIII в. Излагая обе теории, они в конечном счете воздерживаются от окончательного вывода: "Возможно, что обе теории справедливы одновременно". Такой уровень учения о теплоте (а следовательно, и о холоде) не позволял еще подвести базу под поиски новых путей получения низких температур. Однако уже можно было прогнозировать некоторые общие положения, относящиеся к этой области. Первое из них связано с вопросом о том, существует ли нижняя граница температурной шкалы и если существует, то как далеко она находится? Второе положение связано с не менее интересным и важным вопросом – как будут вести себя газы и жидкости при низких температурах?

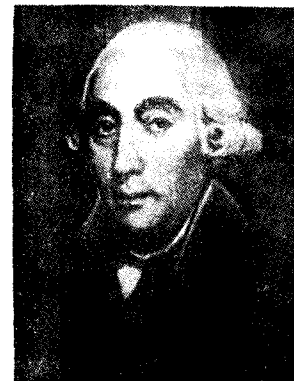


Рис. 1.6. Джозеф Блэк

1.4. "НАИНИЗШАЯ СТЕПЕНЬ ХОЛОДА"

Итак, понятия "тепло" и "температура" были разграничены; был накоплен экспериментальный материал, позволяющий в первом приближении подойти к теории тепловых явлений. Естественно, в порядок дня встал вопрос о том, как далеко может простирается температурная шкала – как вверх, так и вниз.

По части верхнего предела температур и та и другая гипотезы ничего существенного дать не могли; действительно, как определить предельное содержание "тепловой материи" – теплорода в теле (и есть ли такой предел вообще)? Точно так же не было возможности установить, какая интенсивность теплового движения молекул (корпускул) тела может быть предельной.

По этим причинам вопросом о существовании верхнего предела температур специально никто не занимался. Он вообще не был в то время актуальным (того, что давал огонь, вполне хватало и для практики, и для научных исследований).

Совсем иная ситуация сложилась в области низких температур. Здесь можно было подойти к решению задачи как с позиций вещественной, так и корпускулярной теорий теплоты. Кроме этого, и в части экспериментального исследования можно было ожидать много нового, в особенности при охлаждении различных газов и жидкостей.

Все занимавшиеся этими вопросами с редким единодушием и независимо от приверженности к той или иной гипотезе о природе тепла приходили к выводу, что нижний предел охлаждения несомненно существует.

Первым и здесь был Г. Галилей. Вот его мнение, относящееся к 1613 г.: "При увеличении количества теплорода температура тела повышается, а при уменьшении – понижается. При полном отсутствии теплорода в теле достигается наинизшая возможная температура".

Английский философ Д. Локк, придерживающийся противоположной – корпускулярной теории теплоты, пришел тем не менее к такому же выводу (1698 г.): "...Максимальная степень холода означает прекращение движения неосязаемых частиц".

Уже упоминавшийся ранее в связи с историей создания термометра Гийом Амонтон (1663–1705 гг.) обратился в 1702 г. с двумя докладами во Французскую академию наук, которые, к сожалению, мало известны. Первый доклад посвящен некото-

рым новооткрытым свойствам воздуха и способам точного определения температуры. Г. Амонтон рассматривал тепло как движение частиц тела, хотя он никак не объяснил природу этого движения. Тепло, по его мнению, служит и общей причиной всех передвижений на земле, ибо "при отсутствии тепла мельчайшие частицы земли остались бы без движения". Он подтверждал это положение наблюдениями над направленным движением воздуха в атмосфере, вызванным воздействием тепла. По существу он был совершенно прав, так как движение масс воздуха в атмосфере, так же как воды в морях и океанах, неразрывно связано с тепловыми воздействиями на них.

Мимоходом Амонтон заметил: "Мы не знаем предела тепла и холода, но полученные результаты устанавливают соответствие между ними для тех, кто хочет поразмыслить над этим". В следующем году (1704 г.) Амонтон представил Академии еще одну статью, расширяющую пределы исследований. В ней он подчеркнул, что, поскольку степень тепла в его термометре регистрируется высотой столбика ртути, которую тепло поддерживает воздействием расширяющегося воздуха, то, следовательно, крайняя степень холода будет такой, какая сможет лишить воздух способности к расширению. Это "будет куда более сильный холод, чем тот, о котором мы говорим "очень холодно".

Из экспериментов Амонтона получалось, что воздух не будет сжиматься, если его охладить ниже температуры замерзания воды на число градусов в 2,5 раза превышающее интервал, разделяющий температуры кипения и замерзания. Другими словами, если разделить его между крайними точками на 100 частей, тогда абсолютный нуль воздушного термометра Амонтона будет на уровне -250° .

Это удивительно близко к истинному значению абсолютного нуля: $-273,15^{\circ}\text{C}$.

Вклад Амонтона в науку постигла судьба, которой часто отмечены "слишком передовые" открытия – он был попросту игнорирован, или, во всяком случае, недооценен научным миром того времени (да и позднее). Только Д. Блэк признавал приоритет Г. Амонтона в термометрии и теории теплоты. В частности, он соглашался с положением Амонтона, что воздух можно привести "при достаточном холоде" даже в твердое состояние. Он, ссылаясь на труды Амонтона, назвал его "выдающимся членом Королевской Академии наук в Париже".

Позже немецкий ученый И. Ламберт повторил в 1750–1755 гг. опыты Амонтонна и в работе "Пирометрия", вышедшей в 1779 г., подтвердил его результаты, вновь обратившись к абсолютной шкале температуры. Наблюдения Ламберта были проведены с большой тщательностью и привели к небольшой коррекции значения абсолютного нуля (до -270°C). Ламберт указал, что эта температура может быть названа "абсолютным холодом" и при этой температуре объем воздуха практически станет неощутимым. Иными словами, частички воздуха слипнутся вместе и он будет плотным, как вода.

И. Ламберт справедливо отметил, что открытие Г. Амонтонна нашло мало приверженцев потому, что оно было слишком прекрасным и передовым для своего времени. То же самое, кстати говоря, произошло с работой самого Ламберта по теории теплоты.

Все это становится понятным, если сравнить полученные Амонтоном и Ламбертом значения с другими прогнозами, сделанными значительно позже.

Английский врач и физик А. Кроуфорд (в то время такое сочетание было вполне обычным) писал в 1799 г.: "Каждое тело содержит в себе известное количество тепла. Если бы оно могло отдать ее, то само охладилось бы до абсолютного нуля. По моим подсчетам эта температура лежит ниже точки замерзания воды на 1532° ". Если даже учесть, что Кроуфорд пользовался шкалой Фаренгейта, полученная им цифра все же очень далека от действительного значения абсолютного нуля ($-459,65^{\circ}\text{F}$). Позже Д. Дальтон в своей "Философии химии" предложил даже цифру -3000° . Можно назвать еще несколько прогнозов положения абсолютного нуля температур, сделанных весьма известными учеными. Так, Лавуазье и Лаплас дали в своей знаменитой работе о тепле два значения: $1500-3000^{\circ}\text{C}$ ниже точки таяния льда и затем 600°C .

Сторонники корпускулярной теории теплоты тоже не сомневались в существовании абсолютного нуля температур. Петербургский академик Г. Крафт писал: "Тепло и жар, по мнению всех естествоисловцев, состоит в нарочито скором и смешанном движении малейших частиц между собою, которое тем скорее бывает, чем больший градус жара производит. Ежели же сие внутреннее движение начнет умаляться, что рождается стужей, которая тогда в самый большой градус приходит¹,

когда сие движение совершенно перестанет и тончайшие частицы между собой в покой приведены будут".

Того же мнения придерживался и М. В. Ломоносов. На основе своего варианта корпускулярной теории, изложенной в работе "О причинах тепла и стужи" (1744 г.), он пришел к выводу, что "по необходимости должна существовать наибольшая и последняя степень холода, которая должна состоять в полном прекращении вращательного движения частиц".

Но что можно ожидать на пути к "последней ступени холода" в этой неизвестной области "terra frigidus incognita", какие новые открытия она сулит, можно предполагать, только опираясь на известные в то время физические явления. Основное внимание было поэтому сосредоточено на изменениях агрегатного состояния вещества. В то время было известно только одно вещество, могущее быть как в твердом, так в жидком и газообразном состоянии, – вода. Для некоторых металлов были известны твердое и жидкое состояния (последнее – при плавлении). Ртуть была получена в твердом виде искусственно только в 1760 г. академиком И. Брауном в Петербурге посредством смеси снега с разбавленной серной кислотой. Раньше твердая ртуть наблюдалась впервые при сильном морозе в Иркутске (1736 г.). До этого существовало твердое убеждение, что в отличие от других металлов ртуть всегда жидкая. Утверждали, что некоторые жидкости (спирт, эфир) существуют только в жидком и газообразном состояниях, а газы – только в газообразном. Что будет с ними при низких температурах – оставалось неясным. Однако молекулярные представления о природе тел и корпускулярная теория теплоты¹ давали возможность делать некоторые прогнозы. Приведем два из них – более ранний – физика И. Ламберта (1743–1777 гг.) и универсального ученого (физика и химика) А. Лавуазье (1743–1794 гг.). И. Ламберт писал: "Степень тепла, равная нулю, может быть фактически названа абсолютным холодом. Значит, при абсолютном холоде объем воздуха равен, или почти равен, нулю. Можно сказать, что при абсолютном холоде воздух становится столь плотным, что его частицы абсолютно соприкасаются одна с другой, так что воздух становится непроницаемым". Другими словами, Ламберт говорит о твердом воздухе – "воздушном льде"².

¹ Независимо от того, какой вид движения брался за основу – колебательный (как у Бернулли) или вращательный (как у Ломоносова).

² Справедливость требует вспомнить, что первым указал на возможность замораживания воздуха Г. Амонтон.

¹ Вспомним "перевернутые" шкалы термометров Делиля и Цельсия! Отсюда и "большой градус".

А. Лавуазье дал уже более развернутую и образную картину: "Если бы мы смогли поместить землю в некую весьма холодную область, например в атмосферу Юпитера или Сатурна, то все наши реки и океаны превратились бы в горы. Воздух (или по крайней мере некоторые его компоненты) перестали бы быть невидимыми и превратились бы в жидкость".

При этом интересны два момента – не только предсказание возможности оживления компонентов воздуха, но и пророческое указание на свойства "холодного" космоса.

Однако далеко не все понимали возможность и реальность хотя бы в будущем оживления газов. В этом отношении характерен пример Д. Свифта – человека, который не только очень во многом опередил свое время, но и сделал некоторые научные прогнозы, которые до сих пор вызывают удивление. Достаточно вспомнить его предсказание о том, что у Марса есть два спутника. В его время их никак нельзя было разглядеть, и комментаторы до сих пор гадают, как это получилось.

Но даже Свифт считал оживление воздуха совершенно невыполнимым. В "Путешествии Гулливера" он описал академию в Лапуте, в которой дал карикатуру на Лондонское Королевское общество. При этом со свойственным ему сатирическим мастерством он придумал лапутянским академикам совершенно бессмысленные темы научных работ. Среди них наряду с извлечением солнечного света из огурцов фигурирует и оживление ("сгущение") воздуха.

Это описание относится к 1726 г. "Под началом великого ученого находилось 50 рабочих. Они сгущали воздух, делая его осязаемым, извлекая из него азот и давая испаряться текучим и водянистым частицам".

Но самое интересное во всем этом, что, желая посмеяться над учеными мужами, Свифт сделал предсказание, идущее намного дальше, чем серьезное научное пророчество Лавуазье. Извлечение азота из жидкого воздуха, о котором писал Свифт, это же основа целой отрасли низкотемпературной техники XX в.!

Мы еще вернемся к этой теме в одной из следующих глав; теперь же нужно обратиться к истории – к той ее части, которая относится к началу экспериментальной физики низких температур.

Глава вторая

НАЧАЛО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР (первая половина XIX в.)

*Если я занимаюсь каким-либо предметом,
я сначала произвожу опыты,
а потом делаю выводы
и строю доказательства.*

Леонардо да Винчи

2.1. ОЖИЖЕНИЕ "ПОСТОЯННЫХ" ГАЗОВ

В конце XVIII в. исследователи имели в своем распоряжении два способа получения низких температур: смешение (охлаждающие смеси) и испарение жидкости.

Усовершенствование и того и другого способов для получения возможно низких температур рассматривалось не столько как самостоятельная цель, сколько как средство для оживления газов и замораживания жидкостей. Со времен Амонтона и Блэка мысль о возможности оживления и даже замораживания всех газов завладела умами многих исследователей. Однако на практике физикам до этого времени удалось перевести в твердое состояние из жидкостей только ртуть, а из газов в жидкое – лишь аммиак NH_3 и сернистый ангидрид SO_2 . Первое сделал совершенно случайно голландский физик М. Ван-Марум (1750–1837 гг.), исследуя сжимаемость аммиака путем сжатия его ртутью в стеклянной трубке. Он заметил (1787 г.), что при давлении около 0,6 МПа аммиак превращается в жидкость уже при комнатной температуре. Г. Монж и Л. Клуэ оживили в 1780 г. (уже специально) SO_2 другим путем: они не повышали давление, но зато понижали температуру, применяя классическую охлаждающую смесь – лед с поваренной солью.

Стало очевидным, что для дальнейшей успешной работы по переводу газов в жидкое состояние нужно было, с одной стороны, совершенствовать способы повышения давлений и, с другой, найти пути интенсивного охлаждения с помощью испарения или охлаждающих смесей.

Первая задача была чисто конструктивной и решалась к тому времени относительно просто. Были известны два способа ее решения:

с помощью нагревания газа или жидкости в замкнутом пространстве и использования полученного повышения давления для сжатия исследуемого газа;

в результате применения для повышения давления механического устройства типа поршневого насоса. Проще всего было использовать жидкостный насос, накачивая жидкость (например, ртуть) в сосуд, занятый исследуемым газом. Вдавливаясь в него, жидкость занимала определенный объем, вытесняя газ и повышая его давление.

Использовались и некоторые более хитрые способы повышения давления — например, проведение в замкнутом пространстве химической реакции с выделением нужного газа. Подумались даже погружать в море пузырь с газом, чтобы его сжимало давление воды на глубине.

Во всех случаях (кроме последнего) трудность состояла в выборе материалов для сосуда, в котором производился эксперимент. Сосуд должен был быть достаточно прочным, чтобы выдержать высокое давление; кроме этого, желательно, чтобы он был прозрачным и позволял наблюдать процесс ожигения. Лучше всего подходило стекло, но оно часто лопалось (М. Фарадей несколько раз пострадал при взрывах стеклянных приборов). Чугунные сосуды тоже разрывались. В конце концов опыты такого рода при высоких давлениях стали проводить в стальных или медных сосудах.

Вторая задача — совершенствование способов охлаждения — относилась больше к области физики и требовала теоретического осмысления. После работ Д. Папина, установившего зависимость температуры кипения воды от давления, и Д. Блэка, открывшего "скрытую теплоту" плавления и кипения, пути такого осмысления открылись.

Древнее испарительное охлаждение получило теперь однозначное объяснение. Стало очевидным, что на процесс перехода жидкости в пар нужно затратить определенное количество тепла, которое пар уносит с собой, хотя его температура и остается той же, что и жидкости. Если испарение производить без внешнего нагрева (например, огнем или солнечным теплом), а пар отводить (вспомним египетских рабов с веерами-опахалами), то необходимое количество тепла можно взять только у самой жидкости. Естественно, что ее температура при этом понижается. В соответствии с открытием Папина должно понижаться и давление пара (чем выше

давление, тем температура кипения выше; чем ниже давление — ниже температура кипения). Однако испарение воды или другой жидкости (например, эфира) происходит в воздухе, который в процессе не участвует, а напротив, давит на воду, мешая, по-видимому, ей испаряться. Что, если поместить сосуд с испаряющейся жидкостью под колпак воздушного насоса и откачивать из-под него и воздух, и образующийся пар исследуемой жидкости? Воздушный вакуумный насос, изобретенный знаменитым физиком и бургомистром Магдебурга Отто фон Герике и усовершенствованный Р. Бойлем, был уже в это время в распоряжении исследователей.

И действительно, опыты показали, что температура кипения жидкостей под вакуумом быстро понижается, а вода даже может быть заморожена. Таким образом, исследователи, расширив область возможностей испарительного охлаждения, получили мощное экспериментальное средство для дальнейших работ по ожигению газов воздействием низких температур.

В это же время продвинулось вперед как исследование, так и совершенствование второго метода охлаждения — посредством смешения (растворения). Существенную роль сыграло здесь наблюдение Р. Бойля, сделанное при изучении охлаждающих смесей. Он заметил, что не всякие соли годятся для приготовления охлаждающих смесей на основе водяного льда. Соли, препятствующие быстрому таянию льда, не давали эффективного охлаждения. Наоборот, те соли, которые способствовали его таянию и растворялись в получающейся воде, давали эффективное охлаждение. Эти результаты содержались среди прочих важных сведений в его докладе Лондонскому Королевскому обществу в 1682 г.: "Новые опыты и наблюдения над холодом или экспериментальная история холода". Что, по существу, означало выражение "способствовала таянию"? Очевидно, что лед таял тем быстрее, чем лучше данная соль или другое вещество растворялись в воде. Переход соли в раствор понижал температуру его затвердевания; поэтому раствор оставался жидким и при понижении температуры. Соль могла растворяться и дальше по мере таяния льда. При этом тепло забиралось на "скрытую" теплоту плавления льда и поглощалось водой. Низкая температура поддерживалась до тех пор, пока не таял весь лед. Р. Бойль использовал большое число охлаждающих смесей льда с различными солями и кислотами и установил их свойства.

Наконец М. Фарадей придумал соединить охлаждение растворением с действием вакуума. Это позволило еще больше понизить температуру при оживлении газов.

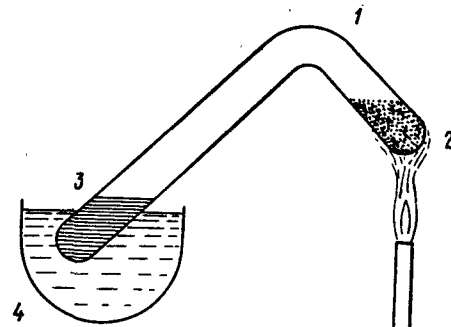
Прежде чем перейти к описанию этих исследований, нужно, по-видимому, сделать одно предварительное замечание. Не следует думать, что опыты по оживлению газов были приостановлены до тех пор, пока полностью прояснятся все практические и теоретические вопросы, связанные с этим процессом. "Штурм крепости" упорно продолжался, а теоретическое и техническое "оружие и боеприпасы" вырабатывались и подвозились в ходе сражения. Ждать, пока "у последнего солдата будет пришита последняя пуговица", было нельзя. История науки показывает, что ее движение осуществлялось именно таким путем наиболее быстро.

Первым, кто в XIX в. обеспечил решающий прорыв в новую область, был знаменитый М. Фарадей. Этот удивительно разносторонний гений науки, продвинувший намного вперед целый ряд ее направлений (от химии и учения об электричестве до металлургии и научной терминологии), сделал очень существенный вклад в физику и технику низких температур. Он по праву может числиться в кругу основоположников низкотемпературной техники. М. Фарадей начал работать в этой области с 1823 г. Важно сразу же отметить, что он использовал самую простую экспериментальную технику, но в сочетании с оригинальными способами постановки и решения задач получались результаты исключительной ценности.

Началось все с того, что он, по поручению своего шефа Г. Дэви, изучал влияние нагрева на хлоргидрат $\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}$. Прибор, использованный им для этой цели, был предельно простым (рис. 2.1). Эта была изогнутая стеклянная трубка, запаянная с обоих концов. При нагревании кристаллы расплавлялись, выделяя зеленовато-желтые пары (это был хлор), которые осели на стенках холодного колена трубы в виде зеленовато-желтых капель. Далее произошла небольшая сцена, о которой часто вспоминают в биографиях М. Фарадея. В лабораторию вошел друг Дэви доктор Парри. Окинув взглядом установку, на которой работал Майкл, он заметил желтые пятна на стенках трубки и решил, что это следы масла, оставшиеся на стенках. Сделав по этому поводу соответствующее замечание, он удалился. На следующий день он получил записку от Фарадея: "масляные пятна оказались жидким хлором". Этот незначи-

Рис. 2.1. Трубка Фарадея:

1 — изогнутая трубка; 2 — вещество, выделяющее при нагреве оживаемый газ; 3 — холодное колено трубки с оживленным газом; 4 — сосуд с охлаждающей водой



тельный эпизод полон глубокого смысла. В нем вплотную встретились два уровня интеллекта: ученого доктора Парри, мысли которого не пошли дальше необходимости мыть трубки перед опытом, и недавнего переплетчика-самоучки Фарадея, который понял, что перед ним неизвестный до этого жидкий хлор.

Оживление хлора при комнатной температуре стало возможным потому, что давление в трубке поднялось намного выше атмосферного. Хлор был третьим (после NH_3 и SO_2) газом, впервые переведенным в жидкое состояние.

Фарадей понял, что, используя такую же изогнутую трубку (в дальнейшем она была названа "трубкой Фарадея"), можно попытаться оживить и другие газы. Нужно было только подобрать такие химические реактивы, которые выделяли бы при нагреве нужные газы под давлением.

В серии последующих опытов Фарадей посредством своей трубки (применив незначительное охлаждение, не ниже 0°C) (рис. 2.2) оживил еще шесть газов, из которых пять (кроме SO_2) были получены в жидком виде впервые. Это были: сероводород H_2S , полученный при взаимодействии FeS и HCl (при давлении 1,7 МПа и температуре 10°C), диоксид азота NO_2 , полученный разложением нитрата аммония NH_4NO_3 , циан $(\text{CN})_2$ и диоксид углерода CO_2 . При опытах давление в трубке поднималось довольно значительно (до 5 МПа для NO_2 и 36 МПа для CO_2); трубки несколько раз рвались.

Продолживший работы в том же направлении, что и М. Фарадей, француз К. Тилорье решил, сохранив его методику, перейти на металлическую конструкцию прибора. Первый вариант аппарата, выполненный из чугуна, оказался неудачным. Аппарат при повышении давления разорвался, и препарат погиб. Это

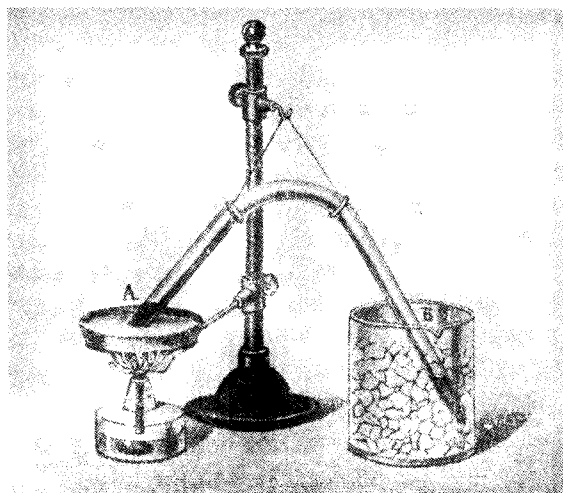


Рис. 2.2. Первый прибор Фарадея для ожижения газов:

A — ванна для нагрева горячего конца трубки; B — сосуд с охлаждающей смесью

произошло в 1840 г.; в дальнейшем установка была усовершенствована (рис. 2.3): чугунные сосуды заменили свинцовыми, покрытыми медью и заключенными в кожух из стальных колец. Первый из них A, играющий роль горячего колена трубки Фарадея, был подвешен на двух стойках так, что его можно было поворачивать вокруг горизонтальной оси CD; внутри его помещен открытый сверху сосуд, заполненный одним из веществ, которое, взаимодействуя с другим, находящимся в нижней части цилиндра, образует газ, нужный для опыта. Такой парой веществ могут служить, например, серная кислота H_2SO_4 и двууглекислая сода NaHCO_3 .

После загрузки реактивов и герметизации цилиндр переводился в горизонтальное положение и вещества смешивались. В рассматриваемом примере кислота выливается на соду и образуется диоксид углерода (углекислый газ CO_2). Открывая кран H, можно перепустить газ в сосуд B через трубку E. При этом, используя высокое давление газа, производили опыты по переводу его в жидкое состояние. Специальное охлаждение сосуда здесь не предусматривалось. Пользуясь этой установкой, Тилорье повторил опыты Фарадея и получил жидкий ди-

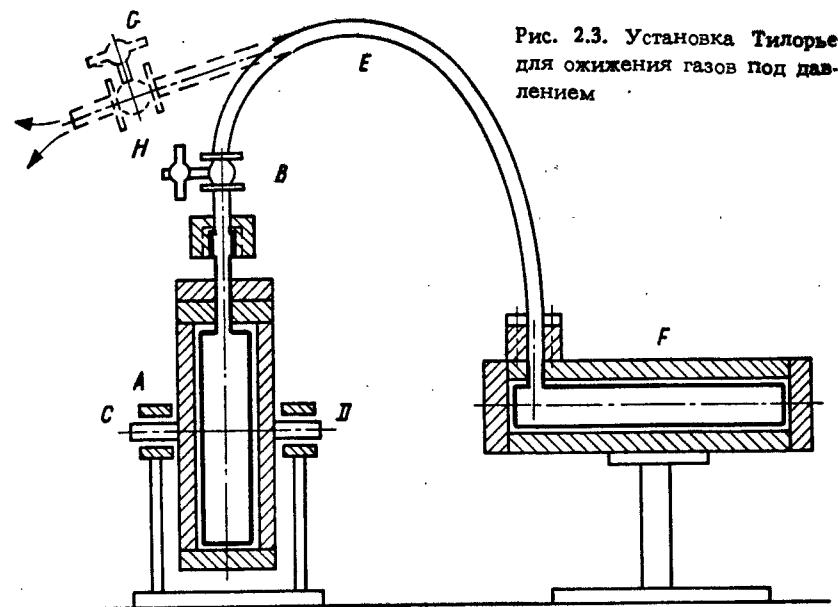


Рис. 2.3. Установка Тилорье для ожижения газов под давлением

оксид углерода в намного большем количестве, что позволяло уже заняться изучением его свойств. При этом было сделано важное открытие, природа которого в то время еще не была достаточно понятна. Она полностью раскрылась только в дальнейшем, и мы к этому вернемся. Однако открытие это сразу же нашло практическое применение и помогло сделать следующий крупный шаг в области перевода газов в жидкое и даже твердое состояние.

Было обнаружено, что если сосуд F, содержащий под давлением жидкий диоксид углерода, отсоединить от сосуда A и, открывая кран G, выпускать жидкость в атмосферу, то она частично испаряется, а частично превращается в белые холодные хлопья, напоминающие снег. Этот "снег" на воздухе быстро испарялся, не расплавляясь. Если на трубку, выходящую из экрана G, надеть холщовый мешок, играющий роль фильтра, то "снег" диоксида углерода можно отделить от газа и собрать, чтобы изучить его свойства. Оказалось, что он испаряется при температуре -79°C , не переходя в жидкость¹.

¹ Поэтому он в дальнейшем и получил название "сухой лед".

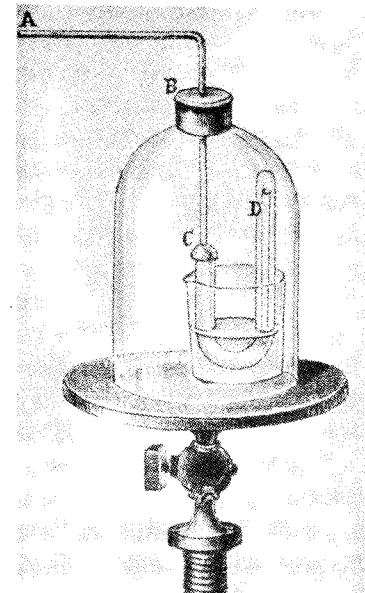
Все эти "чудеса" с углекислым газом вызвали недоверие в ученом мире. К. Тилорье нашел красивый способ продемонстрировать свое открытие. Он начеканил медали из сухого льда и раздал их приглашенным коллегам. Перекидывать обжигающе-холодные диски в руках долго не пришлось – они тут же испарились. Физики и инженеры получили новое, гораздо более эффективное средство охлаждения, чем водяной лед и смеси на его основе. Можно было, пользуясь "углекислотным снегом" получить уже на новой базе другие охлаждающие смеси. Далее было установлено, что по мере понижения давления температура испарения CO_2 опускается до -100°C и ниже.

Фарадей после проведения серии работ по ожижению газов, о которой говорилось выше, занялся другими не менее интересными делами. Однако, после их завершения, в 1845 г. он опять вернулся к этой теме, опираясь уже на новые возможности, связанные с одновременным, совместным действием повышенного давления и охлаждения. К этому времени на основе сухого льда были разработаны две новые охлаждающие смеси – так называемая "смесь Тилорье" $\text{CO}_2 + \text{C}_2\text{H}_5 - \text{O} - \text{C}_2\text{H}_5$ (этиловый эфир) и $\text{CO}_2 - \text{CH}_3\text{Cl}$ (хлорметил). Для большего понижения температуры Фарадей применил и вакуумирование охлаждающей смеси, что позволило ему уверенно перейти рубеж -100°C . Второй прибор Фарадея показан на рис. 2.4. Он представлял собой U-образную стеклянную толстостенную трубку, одно колено которой с помещенным в нем манометром¹ было запаяно, а другое через трубку А сообщалось с газовым компрессором, который мог накачивать в нее исследуемый газ под давлением до 4 МПа. Трубка U-образной формы нижней частью была погружена в охлаждающую смесь Тилорье. Если нужно было вакуумировать смесь, установку помещали под колпак, из-под которого выкачивали воздух через трубку, проходившую в центре подставки. В последнем случае температуру охлаждающей смеси сразу после опыта измеряли спиртовым термометром, снимая стеклянный колпак.

¹ Он представлял собой открытую сверху стеклянную капиллярную трубку с делениями, заполненную воздухом. Капля ртути, запиравшая ее, по мере увеличения давления смещалась вниз.

Рис. 2.4. Второй прибор Фарадея для ожижения газов:

А – трубка для подачи газа под давлением; В – стеклянный колпак для вакуумирования охлаждающей жидкости; С – U-образная трубка для конденсации газа; D – манометр



Пользуясь этим прибором, Фарадей впервые ожижил и даже заморозил многие газы, не поддававшиеся предыдущим исследователям. Были ожижены: бромистый водород HBr , иодистый водород HI , сероводород H_2S , фосфористый водород PH_3 , этилен C_2H_4 , мышьяковистый водород AsH_3 и фтористый кремний SiF_4 ; причем, продолжая охлаждение, первые три удалось и заморозить. Кроме этого, были превращены в лед сернистый газ SO_2 , аммиак NH_3 , монооксид азота NO , циан $(\text{CN})_2$.

Этот мощный прорыв был крупным научным достижением и произвел большое впечатление на современников. Однако сам Фарадей не был полностью удовлетворен его результатом. Несмотря на все усилия, шесть из известных в то время газов: водород, азот, кислород, диоксид азота, оксид углерода и метан – "устояли" и не перешли в жидкое состояние даже при 50 МПа и -110°C . Поэтому их называли "постоянными" газами в отличие от всех других, которые в результате длительных усилий сделались "непостоянными". "Постоянные" газы стойко противостояли всем самым отчаянным попыткам их ожижить. В 1828 г. Колладон сжал воздух до небывалого в то время давления 40 МПа при температуре -30°C . В 1843 г. Эме погружал сосуды с кислородом и водородом в море на глубину более 2 км, где давление составляло 22 МПа. Дальше – больше: 1850 г. – Бертело сжал кислород до 78 МПа и охладил твердым диоксидом углерода CO_2 до -79°C ; наконец, 1854 г. – Наттерер "дожал" несколько "постоянных" газов до 280 МПа – ни один не поддался!

Все эти неудачные попытки привели некоторых ученых к выводу о том, что "постоянные" газы вполне соответствуют своему названию и в принципе не могут быть ожижены (отсюда и термин "постоянные"); поэтому и мучиться с ними не нужно. Однако Фарадей не был с этим согласен; он смотрел намного дальше. При этом он понял, что понижение температуры, которое ему удалось получить, все же недостаточно. "Очевидно, при этой температуре никакое увеличение давления, как бы велико оно ни было, не может ожижить газ. Следовательно, возможно, что для кислорода, азота и водорода температура -110°C выше нужной и поэтому нельзя ожидать, что какое бы то ни было давление (не сопровождаемое большим понижением температуры, чем то, которое достигают) могло заставить эти элементы изменить газообразному состоянию".

Дальнейший ход истории показал, что Фарадей был прав. Нужны были еще более низкие температуры. Но вопрос о том, почему "постоянные" газы не желали ожижаться при температурах выше -110°C , был еще неясен. Не были также и понятны способы, которые могли бы позволить получить еще более низкие температуры. Нужны были в каждом из этих двух направлений как новые идеи и теории, так и экспериментальные работы.

Да и с температурой не все было ясно. Есть ли абсолютный нуль температуры, где он находится и по какой шкале считать эти температуры? Ведь единого термометрического вещества для всей шкалы не было!

2.2. КРИТИЧЕСКАЯ И ТРОЙНАЯ ТОЧКИ. АБСОЛЮТНАЯ ШКАЛА ТЕМПЕРАТУР

Стремление найти температурную границу газообразного и жидкого состояний веществ привело к тому, что наступление на нее велось сразу с двух сторон – и "сверху", и "снизу".

Если не считать отдельных частных попыток, то можно сказать, что решающий вклад в нахождение такой граничной температуры и определение свойств вещества в ней внесли два исследователя – Д. И. Менделеев и Т. Эндрюс. Первый подошел к ней "снизу" – от жидкости, изучая ее испарение, второй – "сверху" – от пара, изучая его ожижение. Лучшее об этом написал сам Менделеев в главном своем труде "Основы химии". Характерно, как скромно он пишет о себе и как тщательно отмечает заслуги других:

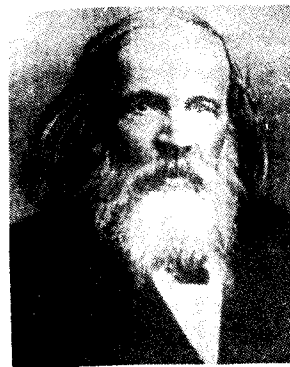


Рис. 2.5. Дмитрий Иванович Менделеев



Рис. 2.6. Томас Эндрюс

"Каньяр де-ла Тур, нагревая эфир в запаянной трубке около 190° , заметил, что при этой температуре жидкость сразу превращается в пар, занимающий прежний объем, т.е. имеющий плотность жидкости. Дальнейшие исследования Дриона, а также и мои, показали, что для всякой жидкости существует такая температура абсолютного кипения, ныне часто называемая критической температурой, выше которой жидкость не существует и превращается в газ". И далее: "... Если в жидкости исчезает сцепление молекул, она становится газом, ибо между этими двумя состояниями нет, кроме сцепления, иного коренного различия. Преодолевая его, жидкость при испарении поглощает теплоту. Поэтому температура абсолютного кипения определена мной (1861 г.) как таковая, при которой: а) жидкость не существует и дает газ, не переходящий в жидкость, несмотря на увеличение давления, б) сцепление равно нулю и в) скрытая теплота испарения равна нулю.

Понятия эти мало распространялись, пока Эндрюс (1869 г.) не выяснил дело с другой стороны, именно, исходя из газов. Он нашел, что углекислый газ, при температурах, вышних, чем 31° , не сгущается (т.е. не ожижается. – В. Б.) ни при каких давлениях, при низких же температурах может сжижаться. Температуру эту он назвал критической. Очевидно, что она тождественна с температурой абсолютного кипения".

Тут все предельно ясно. Если газ имеет температуру выше критической, никаким сжатием его ожижить в принципе нельзя. Остается только один путь – понижение температуры.

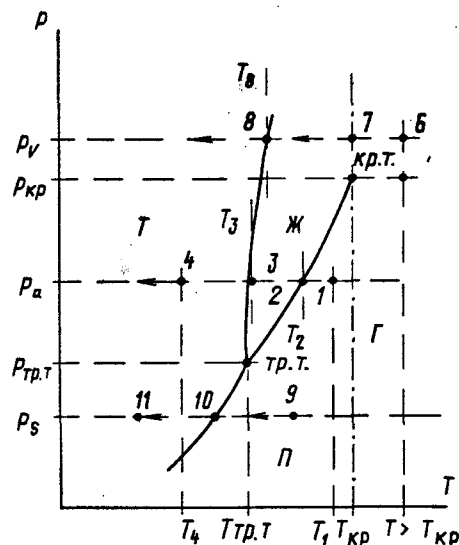


Рис. 2.7. Диаграмма p, T для трех агрегатных состояний вещества: T – твердое; $Ж$ – жидкое; $П$ – пар; $Г$ – газ (пар и газ относятся к одному, газообразному состоянию); кр.т. – критическая точка; тр.т. – тройная точка

Следует добавить, что Т. Эндрюс (1813–1885 гг.) провел далее обширное исследование, заслуженно считающееся классическим, связанное со взаимными переходами газа и жидкости. С его работ, собственно, начинается теория ожижения газов. Он показал, в частности, что чем ниже температура и давление (т.е. чем дальше вещество от критической температуры), тем больше теплота конденсации (и соответственно парообразования). Интересно отметить, что Эндрюс, как и Менделеев, был химиком (а также и врачом – доктором медицины). С 1849 г. он был членом Лондонского Королевского общества.

Было совершенно логично предположить, что и для перехода в твердое состояние тоже существуют соответствующие ограничения; они уже были известны применительно ко льду, воде и водяному пару, а затем подтвердились и на диоксиде углерода. Оказалось, что для каждого вещества существует так называемая "температура тройной точки", определяющая нижнюю границу области возможного существования жидкости; за ней неизбежно происходит переход в твердое состояние. С чем связано название "тройная точка" и как связаны три состояния – твердое, жидкое и газообразное, можно видеть из диаграммы, показанной на рис. 2.7. На этой, так называемой "фазовой диаграмме", нанесены линии,

разделяющие области существования трех агрегатных состояний (фаз) вещества – твердого, жидкого и газообразного. Эти закономерности носят общий характер; меняются только конкретные для каждого вещества численные значения давлений и температур. Проследим, как изменяется состояние вещества с понижением его температуры T при разных давлениях p .

Начнем с пара, имеющего давление p_a ; его начальное состояние соответствует температуре T_1 . Если его охлаждать, подерживая давление p_a постоянным, то при температуре T_2 он начнет конденсироваться и "не сдвинется" с точки 2 до тех пор, пока не перейдет целиком в жидкость. При этом от него должна быть отведена соответствующая "скрытая" теплота конденсации (если бы процесс шел в обратном направлении, то необходимо было бы подводить равную ей теплоту испарения). Далее между точками 2 и 3 жидкость будет охлаждаться от T_2 до T_3 . В точке 3 произойдет затвердевание: вещество при постоянной температуре T_3 перейдет в твердое состояние; при этом будет отведена теплота затвердевания (или при обратном ходе процесса – правления). Далее полученный лед¹ можно охладить до любой нужной температуры, например до T_4 .

Совершенно иначе будет проходить процесс охлаждения газа с давлением $p_{кр}$ и с более высоким давлением (например, p_v). Он перейдет в жидкость при критической температуре $T_{кр}$ сразу, без отвода теплоты конденсации, которая равна в этих условиях нулю. Четкой границы между паром и жидкостью здесь нет. Например, пар, состояние которого соответствует точке 6, перейдет в точке 7 в жидкость сразу, без отвода "скрытой" теплоты конденсации. Дальше, при $T < T_{кр}$ жидкость будет охлаждаться обычным порядком и затвердевает при температуре T_8 (точка 8) с отводом соответствующей теплоты затвердевания. Далее можно охлаждать полученный лед тем же порядком, как и при $p < p_{кр}$.

Основываясь на понятии критической температуры, Эндрюс предложил разделить понятия "газы" и "пары". Газами при

¹ Термин "лед" употреблен здесь в общем смысле; это может быть лед воды, CO_2 или любой другой.

такой классификации называются вещества, находящиеся при температуре T выше критической $T_{кр}$, т.е. вправо от линии, идущей вниз от точки 7. Газы, как бы ни повышать их давление, не переходят в жидкость (если их температура не снижается). Напротив, пар называется газ при $T < T_{кр}$; он может переходить в жидкое состояние и без снижения температуры, только в результате сжатия. Такое терминологическое разделение не связано с каким-либо качественным отличием во внутреннем строении газообразных веществ, но очень удобно практически; поэтому оно сохраняется и теперь.

Рассмотрим в заключение третий случай охлаждения. Здесь при p_c пар (например, точка 9) в результате охлаждения перейдет в точке 10 сразу в твердое состояние; образование жидкости здесь вообще исключено. Далее лед можно охлаждать до любой нужной температуры, например до T_{11} . Если, напротив, двигаться в обратном направлении, соответствующем нагреванию, от точки 11 направо, то при T_{10} произойдет испарение льда (сублимация) тоже без образования жидкости. В обоих случаях — как при сублимации, так и при замораживании пара (десублимации) должно подводиться или соответственно отводиться тепло ("скрытая теплота" сублимации или равная ей теплота десублимации). Классическим примером может служить "сухой лед" (твердый диоксид углерода CO_2). При давлении 0,1 МПа его температура сублимации составляет $-79^\circ C$. Переходя в пар, он поглощает соответствующее количество тепла, охладя, если нужно, какой-либо продукт, например мороженое.

Единственные температура и давление, при которых одновременно могут существовать у каждого вещества все три состояния (отсюда — тройная точка): пар, жидкость и твердое тело (лед) — это $T_{тр.т}$ и $p_{тр.т}$. Малейшее изменение температуры или давления вызывает исчезновение одной из фаз. Если точка, отражающая новое состояние, лежит на одной из линий, разделяющих три области, то будут соответственно существовать две фазы ($T + Ж$, или $Ж + П$, или $T + П$); при p и T , соответствующих всем остальным точкам, — только T , $Ж$ или $П$.

В то время, о котором идет речь, обе точки — и критическая и тройная — были известны только для очень ограниченного круга веществ (в частности, для CO_2). Однако каковы эти температуры для "постоянных" газов и каким термометрическим веществом можно воспользоваться для построения темпера-

турной шкалы в области ниже $-110^\circ C$, было неясно. Очевидно стало, что нужно искать новые, более эффективные методы получения низких температур. Вместе с тем оставался открытым вопрос, как надежно их измерять.

Речь шла не просто о достаточно трудном выборе термометрического вещества для столь низких температур. Вопрос стоял шире и выходил в то время за пределы низкотемпературной физики и техники. Нужна была некая "абсолютная" шкала, не зависящая от свойств того или иного термометрического вещества и простирающаяся до конца — тоже абсолютного нуля температур.

В существовании такого абсолютного нуля уже никто не сомневался, но точно определить, где он находится, без абсолютной шкалы было невозможно. Эти вопросы были неразрывно связаны.

Первый научный комментарий. Чтобы разобраться в том, как они были решены, совершенно необходимо сделать относительно небольшой экскурс в предысторию и историю термодинамики — науки об энергии и ее преобразованиях. Мы видели, что физики XVII и XVIII вв. потратили много сил, чтобы разделить понятия "тепло" и "температура" и научиться измерять каждую из них (соответственно в калориях и градусах). Отсюда и начинается, по-видимому, предыстория термодинамики¹.

На долю ученых XIX в. выпала еще более трудная задача — не только уточнить физическое содержание этих понятий, но и полнее раскрыть связи между ними. Одна ниточка такой связи уже была в их распоряжении — это та, которую нашел еще Д. Блэк. Введя понятие теплоемкости вещества, он показал, что повышение (или понижение) температуры Δt тела связано через его теплоемкость с количеством подведенной (или соответственно отведенной) теплоты следующим образом:

$$Q = c m \Delta t, \quad (2.1)$$

где m — масса тела.

¹ Вообще, установить, откуда началась какая-либо наука — задача очень трудная. Не зря Козьма Прутков уделил столько внимания вопросу: "где начало того конца, которым заканчивается начало?"

Чем больше при данной массе тела теплоемкость c , тем больше нужно подвести или отвести теплоты Q , чтобы изменить температуру на Δt . Д. Блэк также установил, что у разных веществ теплоемкость неодинакова; поэтому одним и тем же количеством теплоты можно получить разные изменения температур. Если же вещество плавится, сублимируется или испаряется, то, несмотря на подвод к нему теплоты, температура вообще не изменяется. Теплота "скрывается", не меняя температуры тела; поэтому Блэк назвал и теплоту плавления, и теплоту испарения "скрытой" теплотой. Значения этих величин тоже были у разных веществ различными.

Это открытие было очень важно и практически полезно, но все же не давало возможности установить некую универсальную связь между теплотой и температурой, независимую от конкретного вещества. Если бы такая связь была установлена, то, измеряя соответствующие изменениям температуры количества теплоты (а это уже умели делать в конце XVIII в.), можно было бы построить единую универсальную шкалу температур.

Инстинктивно ощущалось, что такая связь должна существовать, но где и как ее искать?

Основу для решения этой задачи заложил великий французский ученый и инженер С. Карно в своем (опубликованном в 1824 г., когда ему было 27 лет) труде "Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу". Далее работами Р. Клаузиуса и В. Томсона-Кельвина она была окончательно решена.

В нашу задачу не входит подробное ее рассмотрение, относящееся к области специальной науки – термодинамики. Для тех, кто этим заинтересуется, есть соответствующая, в том числе и популярная, литература [7, 9]. Здесь мы ограничимся лишь теми сведениями из термодинамики, которые понадобятся нам в дальнейшем, чтобы продолжить путь в области низких температур. При этом мы не будем строго придерживаться исторической последовательности в ходе развития теории, а изложим нужные нам положения современным языком и в таком виде, чтобы ими можно было пользоваться в дальнейшем.

Первое, что нужно сделать для этого – уточнить понятие о теплоте. Когда ученые XVII и XVIII вв. говорили о теплоте, то под ней понималось нечто, содержащееся в теле. Вначале

это был *caloric* – "теплород". Затем, после победы корпускулярной теории теплоты, под ней понималась суммарная энергия хаотического теплового движения молекул; таким образом, и при этом теплота оставалась, так сказать, "внутри" тела. Отсюда ведут начало такие понятия, как "скрытая теплота", "теплосодержание" (оба сейчас исключены из употребления¹), а также "теплоемкость", "теплопроводность" и другие им подобные, которые все же сохранились. Однако еще Клаузиус ввел понятие "внутренняя энергия", которое все поставило на место. По Клаузиусу, теплота Q , сообщаемая телу, идет на увеличение его внутренней энергии ΔU и если тело совершает еще и работу L , то и на ее проведение; при этом

$$Q = \Delta U + L, \quad (2.2)$$

что соответствует уже утвердившемуся в то время закону сохранения энергии. Таким образом, теплота Q показывает (так же как и работа L), сколько энергии мы сообщаем телу, если ее подводим (или сколько отбираем, если отводим). Следовательно, и теплота, и работа – это формы, в которых тело может обмениваться энергией с другими телами, т.е. энергия в процессе перехода.

Этот переход может происходить двояким путем. Если он идет в организованной, упорядоченной форме, то все молекулы тела – как отдающего энергию, так и принимающего ее, движутся согласованно в каждом из них, по определенным траекториям. Например, если энергия с помощью зубчатой передачи переходит от одного вала к другому, то все молекулы каждой из шестерен движутся строго по соответствующим окружностям. При этом первая шестерня (ведущая) передает энергию второй (ведомой) в форме работы.

Передача энергии может проходить и посредством хаотического, беспорядочного молекулярного движения. Если привести в соприкосновение два тела – одно горячее, с более высокой температурой T_1 , и другое, холодное, с температурой $T_2 < T_1$, то молекулы первого тела будут "раскачивать" молекулы второго. В результате средняя скорость более "горячих" молекул снизится, а "холодных" – возрастет; соответственно

¹ Вместо "скрытой теплоты" введены термины "теплота плавления" (или испарения), вместо "теплосодержания" – "энтальпия".

температура T_1 первого тела станет ниже, а температура T_2 второго – возрастет. Это означает, что первое тело передало второму некоторое количество энергии, но уже в форме теплоты. Следовательно, содержаться в теле может только внутренняя энергия U . И теплота, и работа только транспортируют энергию к телу или от него. Как только они перенесут энергию, тут же исчезают, переходя в соответствующее количество внутренней энергии. Если соответствующего перехода нет, то нет ни работы L , ни теплоты Q .

Когда все это было установлено, вопрос о том, что такое теплота в принципе был снят.

Что касается температуры, то молекулярно-кинетическая теория тоже дала ей объяснение как меры средней кинетической энергии теплового движения молекул. Но это не решило задачи об универсальной связи теплоты и температуры, а лишь связало температуру с внутренней энергией. Как мы видели, это не одно и то же. Кроме этого, оставался открытым вопрос о температурной шкале. Любое возможное термометрическое вещество не может охватить сколь-нибудь значительный интервал температур, расширяясь равномерно на всем протяжении. Поэтому сделать абсолютную шкалу температур на основе какого-либо термометрического вещества невозможно. Да и вообще, неправильно в принципе связывать температурную шкалу с каким-то конкретным веществом. Надо было "оторвать" ее от физических свойств веществ, сделать *абсолютной*. Логичнее, скорее, поступить наоборот, придумав вещество, которое расширяется точно по абсолютной шкале температур. Клаузиус так и поступил, предложив понятие так называемого "идеального газа".

Чтобы подойти к понятию абсолютной температуры, вторым рассуждения, которыми руководствовался Томсон-Кельвин, но вместо идеальной тепловой машины Карно, которой он пользовался, применим идеальную холодильную машину¹. Такой ход рассуждений ничего не меняет в принципе, но для нашей цели он удобнее.

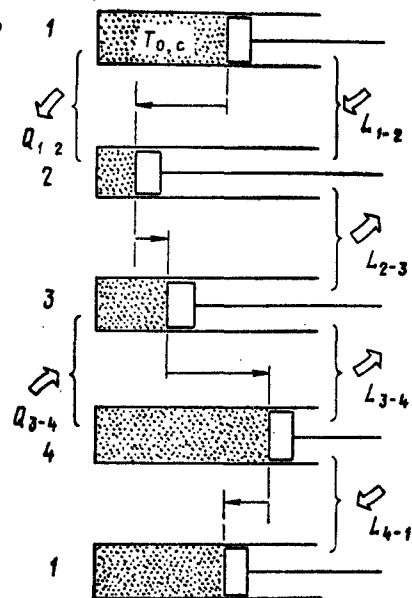
Итак, представим холодильную машину Карно (т.е. идеальную машину, предназначенную для отвода теплоты от тела, имеющего температуру T_0 ниже температуры окружающей

Рис. 2.8. Схема машины, работающей по обратному циклу Карно

среды $T_{0,c} > T_0$, на уровень $T_{0,c}$). Сама энергия не может непосредственно в форме теплоты перейти от менее нагретого тела к более нагретому; холод, как мы знаем, "сам" не получается¹. Поэтому в идеальной холодильной машине необходимо затратить для ее работы некоторую работу L . Эта работа будет минимально возможной для выполнения задачи (ведь машина идеальная).

Схема такой машины, работающей в соответствии с идеей Карно (по обратному, т.е. холодильному, циклу Карно), показана на рис. 2.8. Самый простой ее вариант – это цилиндр с поршнем, в котором рабочее тело (например, воздух) может сжиматься под действием поршня или расширяться, воздействуя на него. В первом случае работа затрачивается, во втором – производится. На рисунке показаны последовательно четыре положения поршня, соответствующие четырем процессам, составляющим цикл. Положение 1 повторено дважды, чтобы нагляднее показать, как замыкается цикл, возвращаясь к исходной точке.

В процессе 1–2 газ, находящийся при температуре окружающей среды $T_{0,c}$, сжимается за счет затраты работы L_{1-2} . При этом от цилиндра отводится в окружающую среду теплота Q_{1-2} в таком количестве, чтобы температура рабочего тела не возрастала (такой процесс при постоянной температуре называется изотермическим). Здесь пара цилиндр–поршень работает как компрессор.



¹ Идею идеальной холодильной машины тоже впервые высказал С. Карно [18]

¹ Это утверждение остается в силе и тогда, когда используются испарение или охлаждение смешением. Дальше мы это покажем.

После того как поршень придет в положение 2, проводится процесс расширения 2-3, в котором поршень производит (отдает) работу L_{2-3} . Этот процесс проводится без подвода или отвода теплоты (стенки цилиндра в это время теплоизолированы). Здесь пара цилиндр-поршень работает как двигатель. Поскольку энергия от газа в форме работы отводится, а теплота не поступает, его внутренняя энергия U в соответствии с (2.2) уменьшается, и он охлаждается до $T_3 < T_{0.c.}$. Полученный холодный газ в последующем процессе 3-4 продолжает расширяться, производя работу L_{3-4} . Но, в отличие от условий процесса 2-3, к нему подводится теплота Q_{3-4} и в таком количестве, чтобы он дальше не охлаждался, а оставался при той же температуре T_3 . Таким образом, процесс 3-4 тоже изотермический и представляет как бы зеркальное отражение процесса 1-2: там работа подводится, но отводится теплота, а здесь наоборот - работа отводится, а теплота подводится. Но в обоих случаях отвод и подвод энергии сбалансированы так, что температура не повышается и не понижается.

Наконец, последний, замыкающий процесс 4-1 состоит в том, что поршень снова сжимает газ и возвращается в положение 1. На это затрачивается работа L_{4-1} , причем цилиндр теплоизолируется - теплота не подводится и не отводится. Температура рабочего тела возрастает до тех пор, пока не вернется к исходной, которая была в положении 1. Процесс 4-1 тоже "зеркально" аналогичен процессу 2-3. Оба они протекают в условиях тепловой изоляции цилиндра, но в противоположных направлениях. Такие процессы, при которых теплота не подводится и не отводится, называются *адиабатными*.

Подытожим теперь результаты, которые получились при проведении цикла 1-2-3-4. Прежде всего нужно отметить, что рабочее тело, пройдя все изменения температуры, давления и объема, вернулось в конце цикла в прежнее положение 1: "каким ты был, таким ты и остался". Следовательно, поскольку газ сделал свое дело и снова принял исходное состояние, его можно исключить из рассмотрения; его энергия вернулась к прежнему значению. Результаты работы цикла, оставшиеся без изменения, надо искать *вне цилиндра*.

Что получилось в итоге здесь?

Начнем с работы. Она была затрачена на сжатие газа в процессах 1-2 и 4-1; возвращена частично в процессах 2-3 и 3-4. Следовательно, общая затрата работы L на проведение

кла составит

$$L = L_{1-2} + L_{4-1} - (L_{2-3} + L_{3-4}). \quad (2.3)$$

Сумма первых двух членов правой части (2.3) больше, чем двух вторых¹, это означает, что проведение цикла в итоге требует затраты работы, равной L .

Что касается теплоты², то итог работы цикла сводится к тому, что теплота Q_{3-4} подводится к рабочему телу на температурном уровне $T_3 = T_4$ и отводится (Q_{1-2}) на более высоком уровне $T_1 = T_2$. Если заставить цикл работать в условиях, когда температуры $T_3 = T_1$ будут находиться на уровне температуры окружающей среды $T_{0.c.}$, то машина, работающая по обратному циклу Карно, окажется именно тем устройством, о котором мечтал еще Ф. Бэкон. Она может отобрать теплоту на температурном уровне $T_3 = T_4$, который ниже, чем уровень T_0 , и отдать его на уровне температуры окружающей среды, т.е. "давать нам холод", не используя никаких внешних охлаждающих средств. Но это не дается даром, а требует определенной затраты работы, которая не может быть меньше L , нужной для машины, в которой осуществляется идеальный цикл - обратный цикл Карно.

Таким образом, была найдена идеальная модель устройства, позволяющего в принципе отвести теплоту с любого уровня температур, лежащего ниже температуры окружающей среды. Каждая холодильная или криогенная установка, какого бы типа она ни была и какими бы особенностями ни отличалась, в конечном счете работает на тех же принципах, на которых основан этот цикл. Первые изобретатели холодильных и криогенных машин "нащупали" эти принципы на базе опыта, методом "проб и ошибок"; в дальнейшем, с последней четверти XIX в., эти принципы, как мы увидим, использовались уже сознательно.

¹ Это объясняется тем, что изотермическое расширение протекает при более низкой температуре, чем изотермическое сжатие, а процесс адиабатного расширения - при меньших удельных объемах, чем адиабатное сжатие.

² Эта теплота, отводимая от объекта, который поддерживается при низкой температуре, обычно обозначается как Q_0 , а его температура - T_0 .

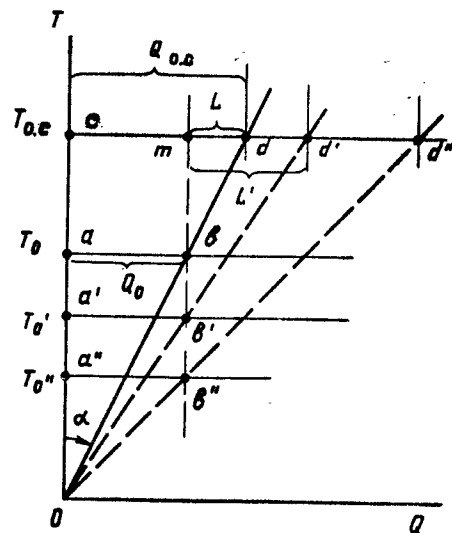


Рис. 2.9. График, показывающий связь величин Q_0 , L и $Q_{0.c}$ при разных температурах T_0 .

Цикл Карно не только дает идеальную модель холодильного процесса; он позволяет и количественно определить, сколько работы нужно затратить, чтобы отвести теплоту Q_0 на низком температурном уровне $T_0 < T_{0.c}$ при

заданной температуре $T_{0.c}$. Более того, он позволяет, как показал Томсон-Кельвин, и установить абсолютную температурную шкалу.

Графическое построение, позволяющее наглядно проиллюстрировать все связанные с этими вопросами количественные соотношения, показано на рис. 2.9.

Проведем на графике две горизонтальные линии: одну верхнюю — на уровне температуры окружающей среды $T_{0.c}$, и другую, нижнюю — на уровне T_0 охлаждаемого объекта. Тогда на последней горизонтали можно отложить отрезок, равный количеству теплоты Q_0 . Если теперь провести через начало координат и точку b прямую (луч), то она отсечет на линии $T_{0.c}$ отрезок cd . Он в том же масштабе покажет количество теплоты $Q_{0.c}$, которое в результате действия цикла будет отдано окружающей среде. Отрезок md на этой прямой будет соответствовать затраченной в цикле работе L , поскольку по закону сохранения энергии

$$Q_{0.c} = Q_0 + L. \quad (2.4)$$

¹ Это уравнение следует из (2.2), поскольку ΔU в цикле равно нулю, рабочее тело вернулось в конце цикла в начальное состояние с тем же значением U .

Из этого же построения следует (поскольку треугольники $0cd$ и $0ab$ подобны), что

$$Q_{0.c} / T_{0.c} = Q_0 / T_0 \quad \text{или} \quad Q_{0.c} / Q_0 = T_{0.c} / T_0. \quad (2.5)$$

Это важнейшее следствие анализа цикла Карно позволяет, как показал Кельвин, подойти к определению абсолютной шкалы температур. Действительно, отношение двух количеств теплоты (которое можно вычислить по свойствам рабочего тела, найденным экспериментально) равно отношению их температур по абсолютной шкале, которая не связана со свойствами какого-либо термометрического вещества. Нужно только присвоить какому-либо одному значению температуры численное значение в градусах, а другое, соответствующее самой низшей возможной точке — абсолютному нулю, принять за нуль. Такая шкала была официально установлена только через сто с лишним лет после выхода статьи Томсона-Кельвина (1849 г.). Это произошло в 1954 г. на IX Генеральной международной конференции по мерам и весам. В качестве опорной точки шкалы была принята температура тройной точки воды; здесь одновременно могут существовать лед, пар и жидкая вода. Ей присвоено значение $273,16 \text{ К}^1$. Начальная точка — 0 К соответствует абсолютному нулю.

Чтобы пересчитать градусы шкалы Цельсия в градусы шкалы Кельвина, надо прибавить к ним $273,15$ ($\text{К} = ^\circ\text{С} + 273,15$).

График, показанный на рис. 2.9, обладает еще одним замечательным свойством: он наглядно показывает, чем определяется и как растет необходимая затрата работы L по мере понижения температуры T_0 . Из него видно, что из подобия треугольников mdb и $ab0$ следует:

$$L = Q_0 \frac{T_0 - T_{0.c}}{T_0}. \quad (2.6)$$

Эта формула была названа именем Карно.

Если мы должны произвести то же количество холода Q_0 , но не при температуре T_0 , а при другой, более низкой, например при $T'_0 < T_0$, и все остальные условия остаются прежними, то

¹ Буква К означает "Кельвин". Размер градуса шкалы Кельвина практически совпадает с градусами Цельсия.

можно воспользоваться не только (2.6), но и найти затрату работы графически. Проведем на графике новую изотерму T_0 и отложим на ней то же количество теплоты Q_0 . Получим точку b' , расположенную под точкой b . Если теперь повторить то же построение, что и для T_0 , проведя из начала координат луч через точку b' , то на линии $T_{0,c}$ получим больший отрезок md' , соответствующий необходимой затрате работы L' . Видно, что чем ниже T_0 , тем больше нужно затратить работы на отвод теплоты Q_0 ; тем холод энергетически дороже. Очевидно, что при дальнейшем понижении T_0 работа L будет возрастать все быстрее, а по мере приближения к абсолютному нулю ($T = 0$) $L \rightarrow \infty$.

Если перевести эту зависимость на язык цифр и принять $Q_0 = 1$ Дж и $T_{0,c} = 293$ К ($\sim 20^\circ\text{C}$), то значение L в зависимости от T_0 будет выглядеть так, как показано в табл. 2.1.

Из таблицы 2.1 видно, что вплоть до температуры $T_0 = 146,5$ К необходимая затрата работы L не превышает количества получаемого холода Q_0 . Другими словами, получение такого холода не требует очень больших энергетических затрат. Но дальше, чем ниже T_0 , тем необходимая затрата работы растет все быстрее: на уровне температуры, равной, например, 50 К, она уже превышает количество получаемого холода более чем в 4 раза. При температуре ниже 25 К это соотношение¹ доходит до десятков, а при еще более низкой температуре – до сотен и тысяч... Из табл. 2.1 видно, что уровень энергетических затрат на получение холода, при котором Фарадей ожижал "непостоянные" газы, "стоил" в единицах работы намного меньше, чем тот, с которым встретились его продолжатели, готовые оживить "постоянные" газы. Следует также учесть, что цифры в таблице относятся только к идеальным процессам; в реальных условиях получение холода связано с различными потерями², которые тем больше, чем ниже температура. Они учитываются КПД соответствующих охлаждающих устройств. Значение этих КПД η_e меняется в пределах от 0,4 для крупных установок до 0,1 и ниже – для малых. Поэтому реальный расход работы L_p оказывается намного выше, чем в идеальном случае:

$$L_p = L_{ид} / \eta_e.$$

¹ Отношение Q_0 / L , обратное этой величине, называют холодильным коэффициентом ε .

² О них подробнее сказано в гл. 3.

Таблица 2.1. Зависимость L от T_0

T_0 , К	L , Дж	T_0 , К	L , Дж	T_0 , К	L , Дж
293	0,0	146,5	1,00	25	10,7
273	0,07	100	1,93	20	13,7
250	0,17	70	3,18	10	28,3
200	0,47	50	4,86	5	57,6
163*	0,79	40	6,32	4,2	65
150	0,95	30	8,77	1,0	292
				0,1	2929

* Это значение соответствует самой низкой температуре, использованной Фарадеем (-110°C).

Работами С. Карно, В. Кельвина и Р. Клаузиуса было установлено, что абсолютный нуль температур находится по шкале Цельсия на уровне $-273,15^\circ\text{C}$. Это позволило создать абсолютную шкалу температур (шкалу Кельвина), градусы (T) которой те же, что и в шкале Цельсия (t), но их отсчет начинается с абсолютного нуля. Следовательно, температура в $^\circ\text{C}$ равна температуре в К* минус 273,15.

М. Фарадей достиг -110°C , т.е. 163 К; на пути к абсолютному нулю осталось пройти "всего" 163 градуса. Из табл. 2.1 можно видеть, насколько труднее с каждым шагом двигаться вниз. Поэтому чем ниже температура, тем чаще приходится вспоминать изречение Ф. Бэкона: "Природа с трудом дает нам холод". Однако получать его все же удавалось, вырывая с колоссальным трудом каждый участок на "пути к абсолютному холоду". Ведь тот же Бэкон сказал и другую, тоже вошедшую в историю, но намного более знаменитую фразу: "Знание – сила" (Knowledge is Power).

Чтобы покорить и оживить хотя бы один из "постоянных" газов, нужно было найти какой-то новый метод понижения температуры, позволяющий оторваться от фарадеевского рубежа хотя бы еще на несколько десятков градусов вниз.

* Обозначение $^\circ$ в шкале Кельвина не используется; после цифры пишется только буква К.

2.3. НОВЫЕ СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

В годы, последовавшие за работами Фарадея, поиски таких новых способов охлаждения приобрели особую интенсивность; в конце концов, к середине XIX в. они были не только найдены, но и в значительной степени изучены. Однако применены они были впервые в холодильных установках, предназначенных для получения искусственного льда (см. гл. 3).

Самое любопытное, что нужно отметить в связи с этими поисками, что люди, стремившиеся оживить "постоянные" газы, искали вначале новые пути совсем не там, где они могли быть в действительности. На самом деле такие способы охлаждения (и не один, а два) уже давно были в принципе известны, но никто в это время не догадался развить их и использовать для ожижения газов. Только начиная с 70-х годов XIX в. новые подходы и способы охлаждения стали более или менее сознательно применяться для ожижения газов.

Первый из этих способов охлаждения был известен очень давно. Многими наблюдениями было установлено, что при сжатии воздуха его температура повышается. При быстром и сильном сжатии это нагревание настолько интенсивно, что даже может привести к воспламенению горючего материала. Известно было даже "пневматическое огниво" — устройство в котором кусок трута зажигают в узкой пробирке вдвижением в нее поршня, сжимающего воздух.

Позднее было замечено и противоположное явление — охлаждение воздуха при быстром расширении. Впервые в научной литературе об этом явлении написал Э. Дарвин (1731–1802 гг.) — крупный исследователь-биолог, врач и поэт, дед Ч. Дарвина. Он, подобно другим выдающимся деятелям того времени, успешно работал во многих областях, в том числе и в области физики. В 1788 г. Э. Дарвин опубликовал работу "Эксперименты по охлаждению воздуха при его расширении", в которой не только констатировал это явление, но и произвел измерения, позволившие зафиксировать существенное понижение температуры. Швейцарский физик и философ М. Пикте, о котором уже упоминалось в связи с "лучами холода", показал (в 1799 г.), что охлаждение, достигаемое этим способом, может быть весьма велико: он наблюдал замерзание капель воды на наружной поверхности трубки, из которой вытекал сжатый воздух. Однако теоретического объяснения этого процесса еще не было.

Явление охлаждения газа при его расширении было понято правильно значительно позже, к началу 50-х годов XIX в., когда утвердился закон сохранения энергии: расширяясь, газ производит некоторую работу за счет уменьшения своей внутренней энергии; соответственно понижается и его температура. При сжатии, напротив, работа затрачивается на увеличение внутренней энергии; вместе с ней растет и температура. Это видно и из (2.2), поскольку в адиабатных условиях Q равно нулю. Если же некоторое количество теплоты будет при расширении поступать извне (как, например, от капель замерзающей воды, что было в опытах М. Пикте), то уменьшение внутренней энергии и соответственно понижение температуры будет не столь значительно.

Исследования, проведенные Гей-Люссаком, Пуассоном и другими, показали, что снижение температуры при адиабатном расширении довольно существенно. Так, для воздуха при начальной температуре $+20^\circ\text{C}$ (293 K) значения падения температуры ΔT составляют (при конечном давлении $p_2 = 0,1$ МПа) в зависимости от начального давления p_1 :

p_1 , МПа	0,5	1	3	6
ΔT , K	105	142	188	212

Естественно, если начальная температура T_1 будет ниже, чем 293 K, то и конечная T_2 тоже снизится.

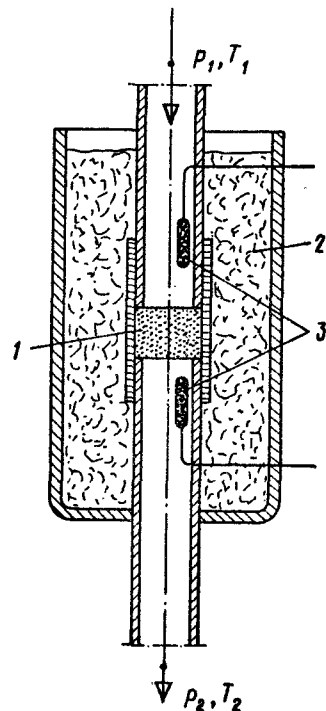
Итак, первый из новых способов охлаждения — расширение газа с отдачей внешней работы, теоретически "был готов к употреблению". Но это, увы, составляло только первую половину дела: ведь идей и решений, необходимых для его инженерной реализации, еще не было. Дальше мы увидим, что "вторая половина дела" оказалась не менее, а скорее, даже более трудной, чем первая¹. Создать первую эффективно действующую машину, в которой производилось бы такое расширение при низких температурах (детандер, от французского слова *détendre* — расширять), удалось лишь через несколько десятилетий.

Второй способ тоже основывался на расширении газа (или жидкости), но другим путем — без производства внешней ра-

¹ Недаром Т. Эдисон говорил, что "идея — это 2% труда, а ее реализация — 98%".

боты. Такое расширение – дросселирование (от немецкого слова *drosseln* – душить, сдавливать) вопреки названию не содержит ничего страшного. Речь идет просто о продавливании текущего вещества через канал с большим гидравлическим сопротивлением – узкий проход в вентиле, пористое тело или трубку с малым сечением – капилляр. Давление вещества при этом, естественно, снижается, но энергия, в отличие от первого способа, нигде не отводится и остается неизменной. Тем не менее дросселирование может использоваться как эффективное средство охлаждения.

Впервые такое охлаждение наблюдал Тилорье (об опытах которого упоминалось ранее), когда выпускал в атмосферу через вентиль жидкий диоксид углерода. Дросселируясь в этом вентиле с высокого давления до атмосферного, жидкость охлаждалась, переходя частично в твердое состояние. Однако из этого факта не было сделано какого-либо обобщающего вывода, хотя он почти сразу же был использован для получения "сухого льда". Только в 1852 г. дросселирование было специально изучено Джоулем и Томсоном. Это было



сделано с основательностью, присущей Джоулю (температура, например, измерялась с точностью до $0,003^{\circ}\text{C}$!).

Они провели две серии опытов; для нас представляет интерес вторая. Схема прибора для ее проведения показана на рис. 2.10. Он представлял собой трубку с дроссельной пористой пробкой из ваты, через которую прокачивался исследуемый газ. Рабочая часть трубки помещалась в изолированный

Рис. 2.10. Схема установки, созданной Джоулем для исследования свойств газов:

1 – пористая дроссельная пробка; 2 – тепловая изоляция; 3 – датчики измерения температуры

термостат. Измерялись температуры и давления газа до пробки и после нее. Начальное давление было $p_1 = 0,45$ МПа. Температура на входе T_1 изменялась от 4 до 100°C . Результаты опыта оказались парадоксальными: как воздух, так и отдельно кислород и азот, из которых он состоит, при дросселировании охлаждались. Соответствующие значения были хотя и не очень большими, но достаточно существенными (примерно $2,5^{\circ}\text{C}/\text{МПа}$).

В дальнейшем зависимости ΔT при дросселировании были уточнены; оказалось, что при низких температурах охлаждение возрастает. Однако при пропускании через дроссельную пробку водорода Джоуль и Томсон установили, что он не охлаждается, а напротив, заметно нагревается!

Все эти явления изменения температуры при дросселировании, впоследствии названные эффектом Джоуля–Томсона¹, не укладывались в закон Джоуля, гласящий, что внутренняя энергия газа зависит только от температуры и не зависит от давления. Ведь при дросселировании внутренняя энергия не может измениться – условия адиабатные, никакой работы газом не совершается. Энергия не изменяется, а температура падает (или, что также непонятно, – растет). В чем же дело?

Эффект Джоуля–Томсона объясняется тем, что внутренняя энергия газа определяется не только хаотическим тепловым движением молекул. В реальном газе существуют и межмолекулярные силы взаимодействия, где присутствуют и притяжение, и отталкивание; соотношение между ними определяется как природой газа, так и температурой и давлением. О силах притяжения писал Д. И. Менделеев, когда объяснял "точку абсолютного кипения" жидкостей. При дросселировании поэтому производится внутренняя работа, затрачиваемая на раздвижение молекул вопреки силам их взаимного притяжения. В результате часть энергии теплового движения молекул переходит в потенциальную энергию их взаимодействия. Соответственно температура газа понижается, хотя общая его энергия не изменяется. Происходит лишь ее перераспределение – убыль кинетической и рост потенциальной.

¹ Нельзя не отметить здесь, что именем Томсона (лорда Кельвина) называют даже не один, а несколько эффектов: Джоуль немного отстал от него, но все же известны: закон Джоуля–Ленца, цикл Джоуля... А единица энергии – джоуль и шкала Кельвина!

По существу, с аналогичным принципом перераспределения энергии связаны и два древнейших способа охлаждения — испарение и использование охлаждающих смесей.

В первом случае, при испарении, от воды (или другой жидкости, например эфира) отбирается энергия, идущая на раздвижку молекул ("разрыв сил их сцепления", по терминологии Д. И. Менделеева), равная теплоте парообразования. Эта энергия уносится с образовавшимся паром, а жидкость соответственно охлаждается.

Во втором случае аналогичная ситуация складывается при плавлении льда — от него в полученную воду отбирается энергия, равная теплоте плавления. Вода при этом не отводится. Возникает вопрос — почему температура опускается значительно ниже нуля? Здесь "вся соль" во второй части охлаждающей смеси — соли, которая, растворяясь в образующейся воде, превращает ее в рассол, остающийся жидким и при более низкой температуре. Поэтому лед продолжает плавиться, несмотря на понижение температуры, отводя тепло от охлаждаемого объекта и передавая его рассолу¹.

Именно этим объясняется то, что заметил еще Р. Бойль — "пригодны для охлаждающих смесей соли, хорошо растворимые в воде".

Остается объяснить странное поведение водорода при дросселировании — он нагревается, а не охлаждается. Это тоже было понято значительно позже. Выяснилось, что здесь действуют те же законы реального газа, что и для воздуха, кислорода и азота. Разница лишь в том, что у водорода при температурах, с которыми работали Джоуль и Томсон, силы отталкивания, связанные со взаимодействием молекул во время их сближений при тепловом движении, играют относительно большую роль, чем силы притяжения. Поэтому перераспределение энергии происходит наоборот: потенциальная энергия взаимодействия молекул при расширении падает, а кинетическая — растет. Соответственно повышается и температура.

¹ Нужно еще отметить, что процесс растворения соли (или других веществ) в воде также сопровождается тепловыми эффектами. Это, как мы уже видели, отмечали еще в древности. Этот эффект может сопровождаться как поглощением тепла, так и его выделением. Второй случай для охлаждения, естественно, не подходит.

В дальнейшем было установлено, что при более низкой температуре водород тоже ведет себя "как и все" — при дросселировании охлаждается. Но для этого нужно, чтобы его температура не превышала 264 К. Оказалось, что в принципе все газы и пары ведут себя по отношению к дроссель-эффекту так же, как и водород, — при высоких температурах в процессе дросселирования нагреваются, а при низких — охлаждаются. Граничная температура получила название *инверсионной*¹.

Ниже даны (полученные уже значительно позже) значения температур инверсии для разных газов:

	Т, К
Азот	604
Воздух	650
Кислород	771
Метан	953
Оксид углерода	644
Водород	264

Каждый из перечисленных газов при температуре ниже инверсионной может быть охлажден путем дросселирования; при достаточно больших начальных давлениях это охлаждение может быть весьма существенным и составлять десятки градусов. Особенно эффективно дросселирование в том случае, когда через дроссель пропускается жидкость и в нем происходит испарение или сублимация. В этом случае внутренняя работа против сил притяжения молекул существенно больше. Именно таким путем Тилорье получил "сухой лед" и пар из жидкого диоксида углерода.

Для всех перечисленных газов температура инверсии намного выше температуры окружающей среды. Поэтому дросселирование как способ охлаждения применимо для них в любом низкотемпературном интервале. Только водород должен быть предварительно охлажден ниже 160 К, чтобы можно было использовать его дросселирование для охлаждения.

В результате исследований свойств газов, проведенных к началу 70-х годов XIX в., были заложены основы двух новых способов охлаждения; ограничения, которые не позволили Фарадею оживить "постоянные" газы в принципе были сняты. Но это — только в принципе. Дальше мы увидим, какой трудный

¹ От латинского слова *inversio* — поворот.

путь нужно было пройти, чтобы не только совершить на практике прорыв в область более низких температур (криотемператур), но и получить первые оживленные "постоянные" газы.

2.4. ПЕРВЫЙ ПРОРЫВ В ОБЛАСТЬ КРИОТЕМПЕРАТУР. "ТУМАННОЕ" ОЖИЖЕНИЕ КИСЛОРОДА И АЗОТА

Многие заседания Французской академии наук были связаны со знаменательными событиями в истории науки и техники. Значение некоторых из них было принято академиком не сразу¹; напротив, многие другие, наделавшие много шума, были впоследствии забыты. Однако заседание 24 декабря 1877 г. с полным правом можно отнести к историческим, несмотря на то, что сообщение, сделанное весьма торжественно секретарем Академии М. Дюма, подтвердилось в дальнейшем лишь частично. М. Дюма начал свое выступление пророческой цитатой А. Лавуазье о возможности перехода при достаточно низкой температуре всех газов в жидкое состояние. После этого он зачитал два сообщения. Первым из них было письмо горного инженера из Шатильона на Сене Л. Кайете о том, что 2 декабря ему удалось оживить один из постоянных газов – кислород. Вслед за этим была оглашена телеграмма из Швейцарии от женеvского физика Рауля Пикте, датированная 22 декабря: "Сегодня получен жидкий кислород при давлении 320 атм и температуре -140°C , достигнутой при использовании диоксида серы и диоксида углерода".

Практически оба сенсационных результата² были достигнуты одновременно, особенно если учесть, что каждый из них потребовал длительной подготовки. Тем не менее вопрос о при-

¹ Таким событием было, например, заседание 1824 г., на котором академик Жирар доложил о работе С. Карно "Размышления о движущей силе огня", ход которой был одним из самых важных событий в истории науки XIX в. Однако академики ее не поняли и не оценили.

² Иногда результаты, полученные Кайете и Пикте, называют "открытиями", говоря, что они "открыли" жидкий кислород. Это, конечно, неверно. "Открытие" можно закон, явление, планету, вещество (или даже живое существо) и т.п. уже существующее в природе, но ранее неизвестное. Получение же вполне прогнозируемого результата посредством вновь изобретенного технического устройства – это крупное научное или научно-техническое достижение, но не открытие.

ритете здесь, как и в других аналогичных случаях, не снимается. По правилам Французской академии наук датой для установления приоритета служит зафиксированный день, когда было отправлено письменное сообщение в Академию. Л. Кайете закончил свою работу раньше, чем Пикте; 2 декабря он направил письмо с описанием своих результатов в Париж Сен-Клер Девиллю, который, получив его 3 декабря, тут же доставил письмо секретарю Академии, который официально зафиксировал эту дату. Задержка с оглашением письма Кайете связана с обстоятельством, которое характеризует его автора с самой лучшей стороны. Он был одним из кандидатов на выборах в члены-корреспонденты Академии, которые были назначены на 17 декабря, и не хотел, чтобы на результат выборов повлияло сообщение о новом научном достижении; более этичным, по его мнению, было участвовать в них "на равных".

Достижения и Кайете, и Пикте заслуживают высокой оценки. Характерно, что способы, которыми они пришли к одинаковому результату, были совершенно различными, но в каждом были ростки новых будущих направлений низкотемпературной техники. Поэтому нужно специально остановиться на работе каждого из них.

Начнем с Кайете. Несколько слов о нем самом и его предстоящих работах.

Луи-Поль Кайете (1832–1913 гг.) – французский инженер-металлург. После окончания Горного института работал на чугунолитейном заводе, принадлежавшем его отцу. Автор ряда исследований, относящихся главным образом к металлургической теплотехнике, в частности к утилизации горячих дымовых газов; с середины 70-х годов основные работы связаны со свойствами оживленных газов и методами их получения. С 1877 г. – член-корреспондент, а с 1884 г. – действительный член Французской академии наук.

Свои исследования Кайете начинал с задачи, имеющей весьма отдаленное отношение к низким температурам, – с изучения свойств ацетилена (C_2H_2 – горючего газа, открытого Дэви в 1836 г.). Поскольку критическая температура ацетилена равна 37°C , его, как выяснилось в то время, можно оживить простым давлением. Этим Кайете и занимался. Прибор, которым он пользовался, практически ничем не отличался от того, который разработал Эндрюс для своих знаменитых опытов с CO_2 .

Он представлял собой толстостенную стеклянную трубу в верхней части которой находился исследуемый газ, сжимавшийся посредством столбика ртути, вдавливаемого водой, нагнетаемый специальным насосом. Все шло как надо, однако во время одного из опытов произошел неприятный случай: один из таких, которые, к сожалению, почти всегда сопутствуют экспериментальным работам. Еще до того, как давление достигло необходимого для оживления значения, произошел срыв запорного крана воды. Часть ее под давлением сжатого ацетилена и ртути выплеснулась наружу; естественно, что объем, занимаемый газом, сразу резко увеличился. Л. Кайете заметил, что в трубке появился туман. Понимая, что газ в трубке несколько охладился при расширении, он решил, что скопились водные пары или другие примеси, содержащиеся в ацетилене. При этом для исследователя были две возможности. Первая – удовлетвориться этим вполне убедительным объяснением, починить кран и работать дальше в том же направлении – давить ацетилен и смотреть, как он оживается. Так поступил бы всякий рядовой ученый – “середняк”. Вторая – копнуть глубже и разобраться до конца в том, что происходит. Л. Кайете выбрал вторую и именно этим заслужил то, что о нем нельзя не вспомнить через сто с лишним лет. Он получил в лаборатории Бертелло тщательно очищенный и осушенный ацетилен и уже специально повторил “дефектный” опыт. И туман появился снова! Сомнений не было: охлаждение газа в трубке было настолько значительным, что ацетилен оживался при низком давлении. И это происходило с очень малой массой газа в тонкой трубке с массивными теплыми стенками!

Именно с этого опыта началась работа Кайете, четко направленная на оживление “постоянных” газов. Он понял, что располагает методом, позволяющим произвести очень значительное охлаждение газа в результате его расширения с отдачей внешней работы. Ведь стеклянная трубка с ртутным поршнем – это по существу детандер, принцип которого описан в § 2.3. При этом газу, производящему работу, совершенно безразлично, куда эта работа идет – используется она или бесполезно тратится на выбрасывание и разбрызгивание воды, выталкиваемой из крана! С этого момента с ацетиленом было покончено. Интерес к опытам с ним был потерян. Это было хорошо только потому, что дало исторические научные результаты.

Важно и то, что изменение объекта исследования уберегло Кайете от большой опасности: как сжатый, так и оживленный ацетилен представляет собой очень взрывоопасное вещество. Тройная связь в его молекуле ($\text{CH}\equiv\text{CH}$) непрочна и легко нарушается от любого, даже очень слабого импульса; взрывы ацетилена многократно приводили к человеческим жертвам. Поэтому обращение с ацетиленом требует соблюдения специальных правил техники безопасности, которые во время Кайете еще не существовали.

В то время, когда Кайете начал свои опыты, уже были получены патенты на настоящие, непрерывно действующие воздушные расширительные машины – детандеры и даже делались первые попытки их изготовления для холодильных установок¹. Но Кайете, по-видимому, ничего об этом не знал. Он натолкнулся на детандер, если можно так выразиться, “однократного действия”, и надо отдать ему должное, выжал из него все, что было возможно. Установка Кайете показана на рис. 2.11. Ее устройство было в принципе несложным. Правая часть представляла собой гидравлический насос высокого давления с манометром, деления которого позволяли измерять давление до 30 МПа. Через трубку TU вода подавалась в экспериментальную установку и вдавливала находящуюся там ртуть в трубку с исследуемым газом. Эта трубка была окружена холодной жидкостью T, служащей для предварительного охлаждения газа перед расширением. Открывая кран U, можно было резко сбросить давление (от 30 до 0,1 МПа); газ быстро расширялся, и происходило его охлаждение.

Вот что писал Кайете своему другу и покровителю Сен-Клер Девиллю 2 декабря 1877 г.: “Не теряя ни минуты, спешу уведомить Вас первого, что сегодня я оживил оксид углерода и кислород. Может быть, я и ошибаюсь, говоря “оживил”, потому что при температуре -29°C , полученной посредством испарения сернистой кислоты, и под давлением в 200 атм я не видел жидкости, но образовавшаяся в этих условиях пыль была столь плотной, что я мог вывести заключение о наличии пара, близкого к точке оживления”.

Эти опыты были затем с громадным успехом воспроизведены в Париже, перед аудиторией ученых. Они также были

¹ Подробно об этом рассказано в гл. 3.

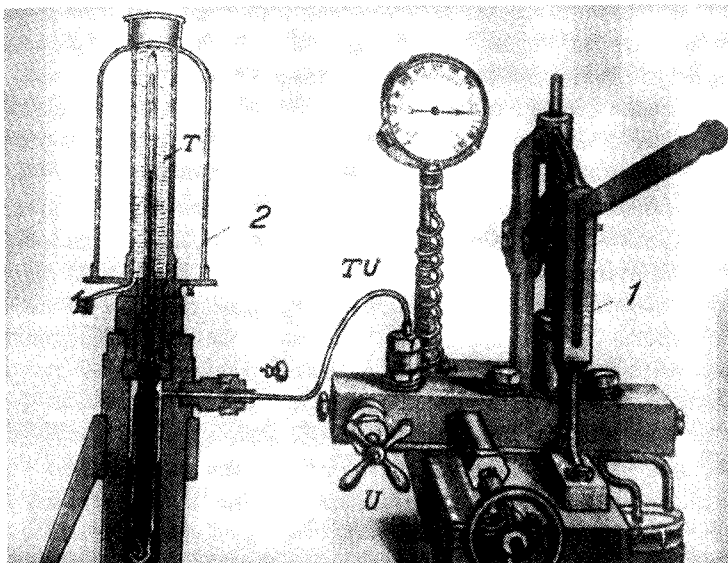


Рис. 2.11. Общий вид установки Кайете для ожижения газов:
1 — насос высокого давления; 2 — ожижительный аппарат

повторены и для разных газов, которые до сего времени не были ожижены: метан, азот, воздух вели себя столь же послушно, как и кислород, образуя ясно видимый туман из мелких капель. Даже опыт с водородом, вновь проделанный в присутствии специальной комиссии Академии, состоявшей из Бертелли, Сен-Клер Девилля и Маскара, при 30 МПа и -28°C обнаружил "не оставляющие сомнения" признаки ожижения в виде "чрезвычайно тонкого и нежного" тумана, который заполнил трубку и мгновенно исчез.

Рассматривая на основе современных данных по свойствам газов достоверность результатов, полученных Кайете, можно уверенно заключить, что ему действительно удалось получить в виде тумана жидкий воздух, кислород и метан. Если даже подсчитать с большим запасом (взять начальное давление не 30, а 20 МПа и конечное — не 0,1, а 0,2 МПа), то получим при начальной температуре -28°C (245 К) для кислорода очень неплохие результаты. Конечная температура будет $97,2^{\circ}\text{C}$ ($-175,8^{\circ}\text{C}$) и доля жидкости 22% для идеального случая и 6%

если принять КПД расширения 0,7. Для метана, у которого выше критическая температура, доля жидкости еще больше. У азота дело обстоит несколько хуже. Идеальное расширение в заданных условиях даст конечную температуру 84 К (-189°C) и долю жидкости 18%. Однако при КПД расширения 0,7 жидкости уже не получится. Здесь где-то лежит предел возможностей опыта.

Что касается ожижения водорода, то расчет однозначно показывает, что в опытах Кайете он не мог быть ожижен ни при каких обстоятельствах; даже в идеальном случае на его аппарате нельзя получить в конце расширения температуру ниже 76 К (-197°C). До критической температуры водорода (33,2 К) отсюда еще очень далеко!

В конечном итоге, несмотря на неудачу с водородом, заслуга Кайете огромна. Он первым перешел черту -110 , -120°C , у которой долго топтались другие исследователи, и проник глубоко в область криотемператур еще по крайней мере на 60 – 70° . Недаром 1877 г. считается годом рождения криогенной техники!

Однако Кайете, по справедливости, должен делить эту славу с другим исследователем — Раулем Пикте, который совершил тот же подвиг и в то же время, но подошел к нему совсем другим путем.

Рауль Пьер Пикте (1846–1929 гг.) — швейцарский физик, родился в Женеве, там же кончил университет. В 1868–1870 гг. продолжил учение в Париже. С 1879 г. — профессор Женевского университета. В отличие от Кайете-инженера, он был по образованию физиком. В то время, когда Пикте начал работу по ожижению газов (ему было всего 30 лет), у него не было существенного опыта ни в исследовательской, ни в инженерной деятельности. Тем не менее установка, созданная им для ожижения газов, была не только намного сложнее, чем у Кайете, но и содержала новые технические решения. Схема ее показана на рис. 2.12. Верхняя ее часть представляет собой не что иное, как металлическую трубку Фарадея, рассчитанную на давление в несколько десятков мегапаскалей. В стальном сосуде L содержатся вещества, необходимые для получения ожижаемого газа посредством их нагрева. С ним соединена длинная стальная труба M длиной 4 м и внутренним диаметром 4 мм. Эта труба играет роль холодного колена трубки Фарадея, но в отличие от нее снабжена на конце вентилем R, позволяющим вы-

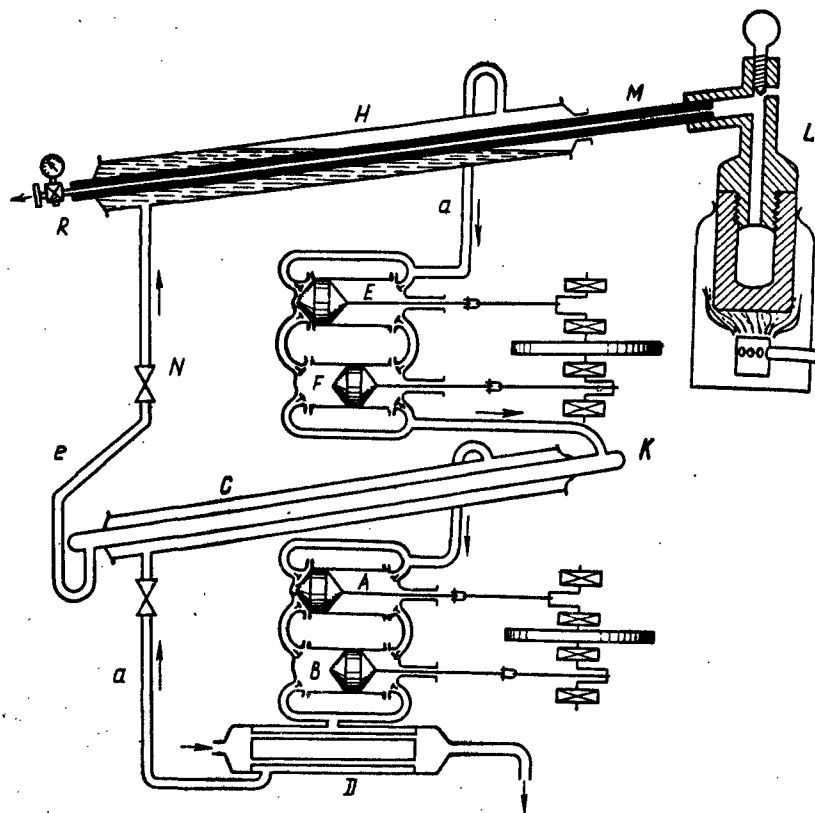


Рис. 2.12. Установка Пикте для ожижения газов

пускать ожиженный газ наружу. Однако охлаждение холодной части сделано совсем иначе, чем у Фарадея. Здесь Пикте не только использовал опыт, накопившийся к этому времени у теоретиков и конструкторов холодильных машин¹, но и продвинулся дальше. Он создал и использовал двухступенчатую каскадную холодильную машину, включающую два последовательно включенных замкнутых контура. Оба они устроены совершенно одинаково; основой каждого служил двухцилиндровый поршневой компрессор. Оба компрессора приводились в действие паровой машиной (на схеме показаны лишь

¹ Подробно об этом рассказано в гл. 3.

маховики, к которым шла от двигателя ременная передача). В контуре, расположенном внизу, циркулировал диоксид серы SO_2 (сернистый газ). В двух ступенях А и В компрессора газ последовательно сжимался от 0,02 до приблизительно 0,6 МПа и поступал в конденсатор D, где охлаждался водой, протекающей в трубках, и переходил в жидкое состояние. Жидкий диоксид серы SO_2 по трубке a через вентиль, где его давление снижалось до первоначального, поступал в кольцевую трубку C, где испарялся, охлаждая и конденсируя диоксид углерода CO_2 , протекающий по внутренней трубке K. Полученный пар снова всасывался в цилиндр А компрессора. Таким образом, в трубке C обеспечивалась температура около -45°C .

Аналогичный процесс протекал и в другом контуре, где работал компрессор с цилиндрами Е и F. Здесь сжимался уже другой хладагент – углекислый газ CO_2 , испарившийся при отводе тепла от металлической трубки Фарадея M в кольцевом пространстве, образованном трубкой H, при температуре около -130°C . Сжатый углекислый газ подавался в трубку K и после конденсации в ней за счет испарения SO_2 возвращался в трубку H через трубку e и дроссель N, охлаждая и, как считал Пикте, переводя в жидкость исследуемый "постоянный" газ. Получившийся пар CO_2 отводился через трубку a в цилиндр E компрессора. В последующих опытах Пикте заменил углекислый газ диоксидом азота N_2O , что позволило ему снизить температуру кипения в трубке H до -140°C .

Добывая кислород нагреванием бертолетовой соли в сосуде под давлением до 20 МПа, Пикте получал, как он думал, в трубке M жидкий кислород, который можно было наблюдать в виде струи из капель и пара, выпуская его наружу через вентиль R. Пикте писал, что это была прозрачная струя, в центре которой находилась белая центральная зона, которую он считал твердым кислородом. В дальнейшем Пикте проделал аналогичные опыты и с водородом, полученным в результате взаимодействия при нагревании муравьинокислого калия HCOOK и едкого кали KOH . И здесь Пикте, как он писал, тоже наблюдал "струю с сине-стальной окраской, падавшую на пол с треском, напоминавшим падение металлической дроби". В дальнейшем Пикте получил аналогичные результаты, работая с азотом и оксидом углерода.

Уже современники, отдавая должное достижениям Пикте и не подвергая сомнению получение им струи жидкого кисло-

рода в распыленном виде, не согласились с его трактовкой полученных результатов. Так, один из французских специалистов по низким температурам Ж. Лефевр писал: "К несчастью, через несколько лет удостоверились в том, что выводы Пикте грешат большими ошибками. Позднейшие опыты показали, что кислород оживает при -130°C под давлением около 25 атм. Что касается водорода, то имея критическую температуру значительно ниже -200°C , он не мог ни оживаться, ни отвердеть в трубке аппарата при -140°C , как это показалось Пикте, и если в данном случае имело место (только) оживание, то оно могло произойти только вне аппарата, под влиянием расширения газа".

Сейчас мы можем уже точно проанализировать как способ оживания, разработанный и использованный Р. Пикте, так и полученные им результаты.

Прежде всего нужно отметить ошибку Пикте в оценке полученных им температур при использовании CO_2 в качестве хладагента¹. Диоксид углерода CO_2 не мог "кипеть" в трубке H , охлаждая кислород до -130°C . Тройная точка CO_2 находится при $t = -56,6^{\circ}\text{C}$; при более низкой температуре углекислый газ может существовать только в твердом виде – как "сухой лед". Поэтому жидкий диоксид углерода, выходящий из трубки K после дросселирования, попадал в трубку H в виде снега (вспомним опыт Тилорье). Этот "снег" и сублимировался там, охлаждая кислород (или другой газ) в трубке M . Температура при этом не могла опуститься до -130°C , так как для этого нужно было бы откачивать пар до тех пор, чтобы установилось давление $p = 3 \cdot 10^{-4}$ МПа. Подобное (или даже близкое) разрежение в компрессоре E достигнуть было невозможно. Температура могла опуститься примерно до -100°C (ей соответствует давление $13 \cdot 10^{-3}$ МПа, что тоже трудно, но было достижимо для техники того времени). Замена CO_2 диоксидом азота N_2O тоже не позволяла использовать для охлаждения кипение жидкости, так как N_2O также затвердеет при температуре намного более высокой, чем -130°C (температура тройной точки $-90,7^{\circ}\text{C}$). Правда, снег N_2O испаряется под более высоким давлением, чем CO_2 , однако и при его использовании трудно

¹ Любопытно, что все комментаторы, переписывая данные Пикте, прилежно повторяют эту ошибку.

откачать пар, чтобы получить -130°C . Реальная цифра, полученная Пикте, едва ли могла быть ниже -120°C (может быть при самых благоприятных обстоятельствах -125°C), т.е. на уровне немного ниже достигнутого еще Фарадеем.

Эта температура близка к критической для кислорода ($154,6 \text{ K}$ или $-118,4^{\circ}\text{C}$). Таким образом, вопрос о том, был ли получен жидкий кислород в трубке M , остается открытым. Во всяком случае, дело было близко к этому. Но очевидно и другое. Расчет однозначно показывает, что при дросселировании кислорода через вентиль R от любого давления выше 10 МПа до атмосферного кислород обязательно охладится до -183°C и частично оживится. Следовательно, нет никакого сомнения в том, что Пикте был прав, утверждая, что из его установки вылетала струя жидкого кислорода! То же относится и к азоту, и к оксиду углерода.

Что касается водорода, то Пикте, как и Кайете, был очень далек от его оживания. Даже при дросселировании с самого высокого давления при таких температурах получение жидкого водорода абсолютно исключено. Все разговоры о "струе с металлическим блеском и сине-стальной окраской" связаны, по-видимому, как с примесями в водороде (в частности, воды), которые могли действительно сконденсироваться, так и с сильным желанием получить нужный результат. Было бы несправедливо осуждать Пикте за эти ошибки. Его огромные заслуги справедливо остаются общепризнанными.

Впоследствии Пикте организовал в Берлине "Лабораторию низких температур", в которой оживание газов производилось в больших размерах. В этой лаборатории Пикте пользовался тем же способом, который был описан выше, но для предварительного охлаждения он употреблял другие газы. Жидкий диоксид серы SO_2 был заменен "жидкостью Пикте", которая состояла из смеси 64 весовых частей SO_2 и 44 частей CO_2 . Эта смесь оживает гораздо легче, чем CO_2 .

Так, Пикте к своему основному достижению – оживлению кислорода, азота и CO оригинальным каскадным методом добавил новое – ввел рабочее тело холодильных установок, состоящее из смеси двух разных веществ. Далее увидим, что идея такого "коктейля" была развита и позволила через много лет создать новые рабочие тела для холодильных и криогенных установок с заранее заданными нужными свойствами.

Л. Кайете после 1877 г. тоже продолжал работать в области низких температур. Он потратил много усилий, чтобы усовершенствовать свою аппаратуру, получить жидкий кислород в форме, позволяющей сохранить его и исследовать, а также оживить водород.

Но "звездный" час декабря 1877 г. уже не повторился. Ни тому ни другому так и не удалось достигнуть заветной цели – подержать в руках и продемонстрировать целому миру сосуд с жидким кислородом или азотом. Это не было случайностью. Оба метода – и Кайете, и Пикте – в принципе не могли дать этот результат. Нужен был иной подход.

Член академии Жамэн в докладе Академии наук 24 декабря 1877 г. сказал: "Теперь доказана возможность превращения кислорода в жидкость или твердое тело. За это говорят эти два опыта, причем опыт Пикте несколько дополняет опыт Кайете... Однако иметь возможность видеть жидкость или туман, не умея то или другое собрать – это еще не все". Еще предстоит проделать в этом отношении заключительную работу, которая будет состоять в том, чтобы сохранить кислород в жидком состоянии при температуре его кипения..."

Это сделали и получили, наконец, оживенные "постоянные газы" через 6 лет другие исследователи – Ольшевский и Вроблевский.

Перед тем как продолжить рассказ об оживлении газов, необходимо вернуться к началу XIX в., чтобы установить, как возникла холодильная техника, и проследить, как она развивалась.

Глава третья

ПЕРВЫЕ ШАГИ ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ (первая половина XIX в.)

*Получить холод очень просто.
Надо ездить на лед и засунуть его
в холодильник.*

Варя Канаева (6 лет)

3.1. ИСКУССТВЕННЫЙ ЛЕД ВЫТЕСНЯЕТ ПРИРОДНЫЙ

Возвращаясь от оживления газов к истории холодильной техники, о зарождении которой шла речь в гл. 1, можно определенно сказать, что в основе ее первых шагов был лед. Он был и исходной базой холодильной техники, и первой ее целью.

Поэтому естественно, что и первый этап развития холодильной техники шел по традиционному "ледовому" пути. Нужно было научиться производить лед искусственно, вместо того чтобы пользоваться тем, что дает бесплатно природа. Конкурировать с природой в этой части было достаточно трудно, во всяком случае в Европе, Сибири и Северной Америке, где льда зимой было предостаточно. Добывать лед не так сложно (рис. 3.1), да и хранить летом тоже не составляло особого труда – это было отработано веками.



Рис. 3.1. Заготовка речного льда в шт. Массачусетс (США) в 1850 г. (на рисунке видны все стадии работы: распиливание льда на плиты, извлечение их из воды и транспортировка на склады)

Понятия "лед", "холод" и "холодильник" были неразрывно связаны. Понятно поэтому, что и первые попытки создания холода без природного льда для бытовых и технических нужд тоже были связаны со льдом – но уже искусственным. Даже в XX в. такое представление было еще живучим. И. Ильф и Е. Петров в известной книге "Одноэтажная Америка" (1935 г.), описывая бытовой холодильник, отметили, что он не только не требует заправки льдом, но и сам его делает!

Мысль о холоде без льда в практическом плане сначала даже не возникала. Цель была ясна. Она состояла в том, чтобы самим делать лед искусственно, а не зависеть от природы; она же и лежала в основе поисков всех первых изобретателей холодильных установок. Иногда такие устройства прямо называли "льдоделательными машинами".

Обращаясь к истокам холодильной техники, нужно, естественно, вспомнить тех, кому впервые удалось получить искусственный лед, и указать – когда и где это произошло. Однако это не так просто.

При изучении истории науки и техники часто бывает не только трудно, но и просто невозможно установить, кто первый сделал то или иное открытие или изобретение. Дело не только в отсутствии достаточно полной информации; иногда и располагая ею, нельзя точно сказать, кто был "первым". Споры об этом в большинстве случаев так же бесполезны, как дискуссия между Бобчинским и Добчинским в "Ревизоре" о том, кто первый сказал "э".

Применительно к получению искусственного льда решить задачу о приоритете вообще невозможно, так как речь идет об очень древних временах.

В начале книги уже упоминалось об индийцах, которые с очень древних времен получали лед "полуискусственным" путем в ясные холодные ночи. Хотя они и пользовались благоприятными условиями, созданными самой природой, немалый элемент изобретательства здесь присутствовал, поскольку были созданы хотя и довольно примитивные, но все же технические устройства.

Первое исторически достоверное известие о полном искусственном получении водяного льда (уже упоминавшееся ранее) относится к 1775 г., когда В. Гюллен, откачивая насосом пар из-под стеклянного колпака, внутри которого находился сосуд с водой, получил в нем лед.

Примерно в это же время искусственный лед был получен и другим путем, о котором мы тоже упоминали ранее, – замораживанием воды на стенке сосуда, в котором расширялся воздух (опыт М. Пикте, 1799 г.).

Таким образом, можно сразу же отметить, что возникли два принципиально различных пути получения низких температур – сначала для замораживания воды, а впоследствии и для создания холодильных машин общего назначения. Первый из них связан с испарением жидкости, второй – с расширением газа (воздуха), сопровождаемым производством внешней работы.

Каждый из этих двух способов развивался и совершенствовался сначала независимо один от другого. Так было примерно до 60–70-х годов XIX в., когда холодильные машины стали выпускаться массово и для разнообразных целей. Иногда мощный взлет холодильной техники 70-х годов называют "холодильной революцией". На неизбежный в такой ситуации вопрос "что лучше?" нужно было ответить в условиях жесткой конкуренции. Как шла борьба двух направлений, какие научные дискуссии велись на эту тему и чем они закончились – мы рассмотрим в конце этой главы. Перед этим нужно проследить непростые пути, по которым развивалось каждое из этих двух основных направлений холодильной техники.

3.2. ГАЗОВЫЕ (ВОЗДУШНЫЕ) ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

О первоначальных попытках создать воздушные (т.е. работающие посредством сжатого воздуха) холодильные машины сохранились лишь отрывочные сведения. Так, в 1755 г. немецкий изобретатель Хоэль в Хемнице (Австро-Венгрия) получил сильное охлаждение воздуха в результате его расширения с отдачей внешней работы. Примерно такие же исследования проводил в Швеции уроженец Мекленбурга Вильке (1771 г.). Это был первый, можно сказать поисковый, период создания воздушных холодильных машин.

Параллельно с ним начиналось и затем было продолжено теоретическое осмысление охлаждения воздуха и других газов при расширении. При этом следует упомянуть Эразма Дарвина (деда Ч. Дарвина), который изучал этот вопрос в 70-х годах XVIII в., а затем Д. Дальтона и Гей-Люссака; наконец, в 1824 г. Сади Карно ввел понятие об обратном (холодиль-

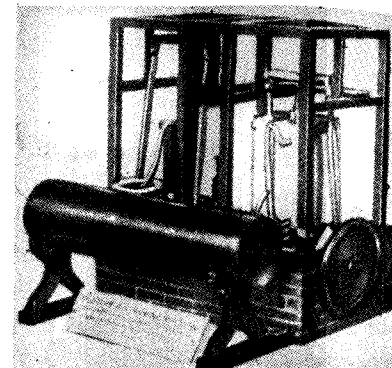
ном) газовом цикле. Этот второй, теоретический этап был продолжен работами Д. Гершеля в 1834 г., а затем В. Сименса и А. Кирка уже в 50–60-е годы XIX в.

Работы по созданию действующих образцов воздушных холодильных машин между тем продолжались и вышли на уровень, позволяющий применить их на практике. Начало третьему этапу положил в 1844 г. американский врач (опять врач) Джон Горри¹ (1803–1855 гг.). Его достижения в этой области трудно переоценить. Дж. Горри изучал медицину в Нью-Йорке и после завершения образования работал врачом в городке Апалачикола (шт. Флорида). Именно жаркий климат этого района побудил Горри заняться холодильными делами. Видя каждый день своих пациентов, мучающихся от высокой температуры в помещениях больницы, он неотступно думал о том, как им помочь. Лед, которого здесь не было, мог бы создавать в палатах совсем другой климат. Не испугавшись трудностей, он решил сделать холодильную машину, позволяющую получать лед в количестве, достаточном для этой цели. В 1845 г. Горри эту машину сделал.

Ее модель, показанная на рис. 3.2, хранится в патентном ведомстве США. "Льдоделательная" машина состояла из цилиндра диаметром около 200 мм (~8 дюймов), в котором воздух посредством поршня сжимался до 0,2 МПа. Тепло, выделяющееся при сжатии, отводилось посредством впрыскивания воды. Сжатый воздух после этого поступал в цилиндрический горизонтальный ресивер, тоже охлаждаемый водой, пропускаемой по уложенным внутри трубкам (он на рисунке расположен впереди фундамента). При последующем расширении воздуха в поршневом детандере в его цилиндр впрыскивалась соленая вода, которая при этом охлаждалась расширяющимся воздухом примерно до -7°C . Она и использовалась для получения льда.

¹ Имеются сведения, что известный изобретатель паровых машин и паровозов англичанин Р. Тревитик (1771–1833 гг.) в конце 20-х годов сделал несколько образцов машин, предназначенных для охлаждения воды и превращения ее в лед. Принцип их действия заключался в том, что сжатый и затем охлажденный до температуры окружающей среды воздух выпускался в воду и, расширяясь там, охлаждал ее до выделения льда. Однако дальше опытов дело не пошло.

Рис. 3.2. Модель "льдоделательной" машины Дж. Горри



Машина вполне исправно работала, но Горри не оставляла мысль о том, чтобы, как говорят у нас, "внедрить" свое изобретение и сделать его доступным всем, кто в нем нуждался. Последующие события вполне соответствовали этому термину. 22 августа 1850 г. Горри сделал заявку на патент, который и получил в мае 1851 г. Это был первый американский патент на холодильную машину.

Из описания к этому патенту можно видеть, что Горри усовершенствовал свою машину, заменив впрыск соленой воды в детандер погружением его в соленую воду. Патентная формула выглядела так: "Процесс охлаждения или замораживания жидкости путем нагнетания воздуха в резервуар, отвода выделяемого тепла компрессии посредством впрыскивания воды, отвода сжатого воздуха для расширения в машину, погруженную в сосуд с незамерзающей жидкостью, которая непрерывно возвращается в цистерну и которая служит средой, поглощающей тепло, отводимое от воды, которая должна быть охлаждена или заморожена, и передано расширяющемуся воздуху".

На рис. 3.3 показана в современном виде схема машины Горри. Она почти безупречна по самым высоким стандартам. Естественно, что машины – компрессор и детандер, входящие в ее состав, конструктивно еще несовершенны, но это скорее говорит в пользу изобретателя. Ведь в это время, по существу, не было почти никакого опыта создания воздушных компрессоров, а тем более расширительных машин – детандеров. Только некоторые идеи и конструктивные элементы можно было заимствовать из опыта создания паровых двигателей. Тем не менее Горри, врач, не имевший ни инженерного образования,

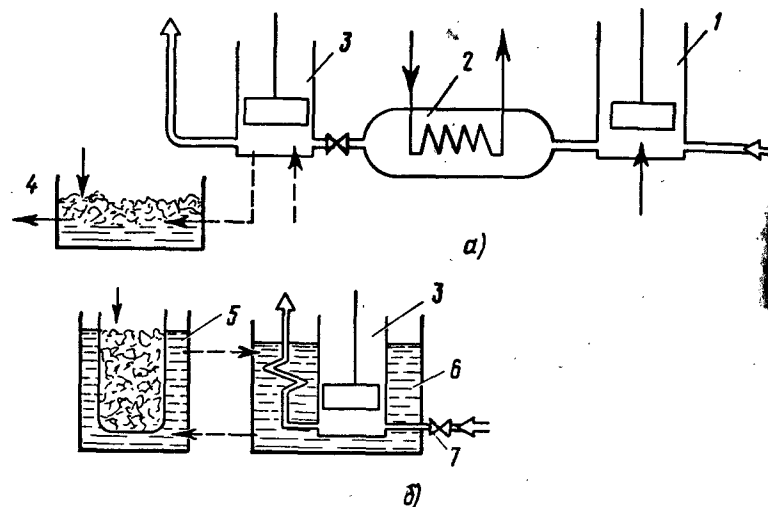


Рис. 3.3. Принципиальная схема "льдоделательной" машины Дж. Горри:

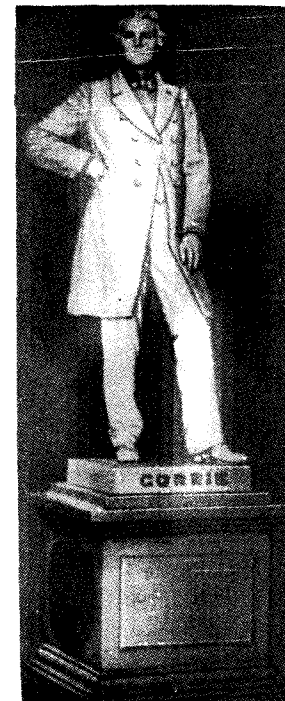
а — первый вариант; б — второй вариант холодной части; 1 — компрессор; 2 — охладитель сжатого воздуха; 3 — детандер; 4 — ванна для непосредственного намораживания льда рассолом; 5 — ванна для замораживания воды в сосуде; 6 — ванна с рассолом, охлаждаемая погруженным в нее детандером; 7 — вентиль; → — воздух; ↗ — вода; --- — рассол

ни практики, сумел осуществить эти машины и на их основе создать вполне работоспособный агрегат.

С "внедрением" машины дело, однако, шло плохо; Горри не мог найти человека с капиталом, который поддержал бы его планы. Наконец он нашел такого партнера, но тот вскоре умер, не успев начать дело.

Не понятый своими современниками и разочарованный цепью неудач, Горри заболел сердечной болезнью и скончался в возрасте всего 52 лет; планы его не осуществились. Как это часто бывает (но тоже не всегда), соотечественники все же оценили его заслуги: через 44 года после смерти Горри фирма, выпускавшая холодильные машины, воздвигла ему памятник в городе, где он работал. В памятном зале Капитолия в Вашингтоне ("зале славы"), где каждый штат устанавливает памятник своему самому выдающемуся гражданину, Флориду представляет Горри.

Рис. 3.4. Статуя Дж. Горри в "зале славы"



Работа Горри не только дала толчок практикам-строителям холодильных машин. Она послужила основой для решающего шага в развитии их теории. Такой шаг был сделан В. Сименсом (1823–1883 гг.) — немецким инженером, переселившимся в Англию и ставшим одним из лидеров в научно-техническом развитии этой страны¹. Он опубликовал в 1857 г. доклад с критическим разбором машины Горри. Отдавая должное его достижениям, Сименс отметил и недостатки; однако особенность этой критики Сименса, свойственная творческим людям, состояла в том, что он показал, как эти недостатки устранить.

Главное в замечаниях Сименса было связано с тем, что воздух, выходящий из цилиндра детандера, который идет на охлаждение соленой воды, недостаточно охлаждается, если его пускать непосредственно в воду (рис. 3.3), как сделано в первом варианте машины Горри. Он предложил этот холодный воздух не выпускать, а направить в специальный теплообменный аппарат противотоком к сжатому воздуху, идущему в детандер. На рис. 3.5, б показано, как изменится в этом случае схема установки. Это предложение, получившее затем название "процесса с регенерацией", было им запатентовано, а сам патент и приведенная иллюстрация из него стали классическими и воспроизводятся практически во всех учебниках по холодильным и криогенным установкам.

¹ В Англии сумели оценить заслуги Сименса. Он получил дворянский титул и из Вильгельма стал сэром Вильямом.

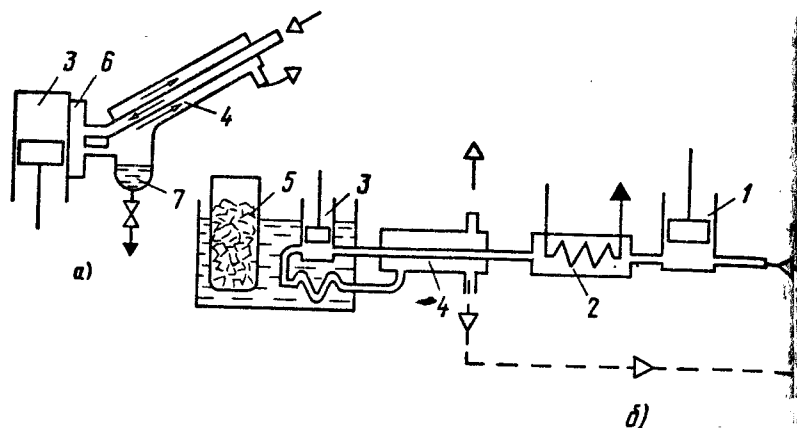


Рис. 3.5. Иллюстрация из патента Сименса (холодильного процесса с регенерацией) (а) и схема машины Горри с усовершенствованием, предложенным Сименсом (б):

1 — компрессор; 2 — холодильник; 3 — детандер; 4 — регенеративный теплообменник; 5 — сосуд для замораживания воды; 6 — золотниковая коробка детандера; 7 — сборник жидкого воздуха

Действительно, идея регенерации тепла, изложенная в этом патенте¹, дает огромные преимущества. Отработавший холодный воздух, который еще сохранил достаточно низкую температуру, не выбрасывается бесполезно, а возвращается в систему и используется для того, чтобы предварительно охладить сжатый воздух, направляемый на расширение. Поскольку в этом случае на вход в детандер воздух поступает более холодным, он и на выходе тоже понижает температуру. Таким образом, при тех же затратах получается большее охлаждение. По существу, после введения регенеративного теплообмена окончательно были установлены те "три кита", на которых стоит вся классическая низкотемпературная техника — детандер (или дроссель), регенеративный теплообменник и компрессор. В дальнейшем мы увидим неоднократные тому подтверждения.

¹ Строго говоря, регенерацию тепла впервые ввел в технику шотландский пастор Р. Стирлинг, когда в 1816 г. изготовил и запатентовал свой воздушный тепловой двигатель [7, 12].

Идея регенерации тепла произвела подлинный переворот и нашла в дальнейшем широкое применение не только в низкотемпературной технике, но и во многих областях энергетики. Используя, например, высокую температуру отходящих дымовых газов, их направляют на предварительный подогрев воздуха, подаваемого в топку.

Вершиной достижений этого периода была воздушная холодильная машина шотландского инженера А. Кирка (1862 г.). Она была уже вполне пригодна для промышленной реализации, и многие ее экземпляры использовались в различных производствах, нуждающихся в холоде.

Сохранились как описания различных вариантов холодильных машин Кирка, сделанные им в докладе Институту гражданских инженеров в Лондоне 20 января 1874 г., так и его патент № 1218 (1862 г.). Из этих документов можно установить, что холодильный агрегат Кирка отличался от машин его предшественников прежде всего тем, что работал по замкнутому процессу — циклу с использованием регенерации тепла, предложенной Сименсом. В ней поэтому постоянно циркулировала одна и та же порция воздуха. На рис. 3.5, б штриховой линией показано, как осуществляется превращение разомкнутого процесса в цикл.

"Замкнутость" процесса позволяет осушить весь воздух, циркулирующий в системе, и тем самым устранить неприятности, связанные с конденсацией или вымораживанием содержащейся в нем воды. Осушка воздуха производилась посредством открытого сосуда с концентрированной серной кислотой H_2SO_4 , помещенного в нагнетательной линии компрессора. В пусковой период влага, содержащаяся в воздухе, поглощалась кислотой; в дальнейшем кислота нужна была только для того, чтобы удалить ту влагу, которая поступает с наружным воздухом через неплотности в коммуникациях.

Кроме перехода на замкнутый процесс. Кирк ввел еще одну новинку — регенерация тепла происходила в его агрегате не в теплообменнике, где два потока газа движутся навстречу один другому (противоточный теплообменник), а в регенераторе. Это устройство, принцип действия которого показан на рис. 3.6, представляет собой трубу, заполненную так называемой "насадкой" — металлической стружкой или "путанкой" из проволоки (а иногда и мелкими осколками камня), через которые воздух свободно проходит. Когда через регенератор

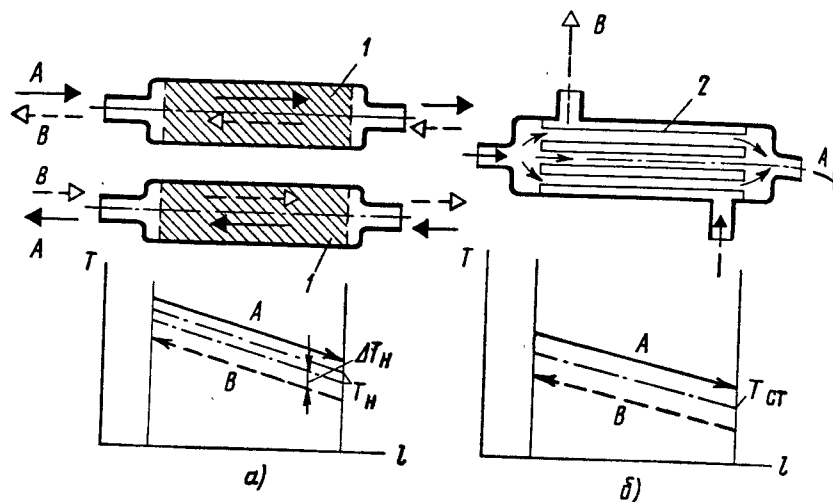


Рис. 3.6. Схема работы регенератора (а) и теплообменника (б), а также графики изменения температур потока А (охлаждающегося) и В (нагреваемого) в этих аппаратах:

1 – насадка; 2 – стенка трубки; температура насадки $T_{\text{нас}}$ меняется в интервале $\Delta T_{\text{нас}}$ в зависимости от того, какой поток (А или В) идет по регенератору; температура стенок трубок теплообменника $T_{\text{ст}}$ по времени не меняется; l – длина теплообменного аппарата

пропускается теплый воздух, насадка нагревается. Затем теплый воздух отключается и в противоположном направлении пропускается холодный, который, охлаждая насадку, сам нагревается. Затем снова пропускается теплый воздух, который охлаждается, нагревая насадку, и т.д. В результате тепло, так же как и в теплообменнике, передается от теплого потока к холодному, но не через стенку, а посредством насадки. Регенератор по устройству проще теплообменника и может на единицу объема передать больше тепла, чем теплообменник.

Усовершенствования, сделанные Кирком, привели к достижениям, намного превышающим результаты, полученные его предшественниками. Сначала он добился температуры на выходе из детандера, равной -13°C , а затем, после доработки и дополнительных улучшений, ему удалось даже заморозить ртуть. Это означало, что впервые в истории температуру ниже -40°C удалось получать непрерывно в холодильной машине

(как тогда говорили "механическим путем"), без каких-либо охлаждающих смесей или испарения под вакуумом легкокипящих жидкостей. По сравнению с этим "физические" методы, посредством которых низкая температура получалась однократно в какой-либо порции вещества. Это был огромный шаг вперед.

Важно также отметить, что Кирк уже вышел за пределы чисто "льдоделательного" мышления и его машина могла производить холод в довольно широком интервале низких температур – от 0 до -40°C .

Сыграло большую роль и то, что Кирк, в отличие от Горри, имел техническое образование, а общий уровень промышленного развития был в то время в Англии выше, чем в США.

В машине Кирка получали 4 кг льда на 1 кг угля. Тогдашние паровые машины требовали от 1,5 до 1,75 кг топлива (угля) на одну эффективную лошадиную силу в час. Такой, на первый взгляд, странный расчет по углю, а не по электроэнергии станет вполне понятен, если вспомнить, что в то время никаких электростанций и электросетей не было. Каждая холодильная установка имела свой индивидуальный привод от своей же паровой машины и, по существу, представляла единый агрегат, состоящий из двух машин: холодильной и паровой.

Чтобы установить, как результаты Кирка выглядят по сравнению с современными холодильными машинами, можно провести небольшой расчет.

Начнем с того, что подсчитаем, какое количество тепла Q_0 должна отвести холодильная машина от 4 кг воды, чтобы превратить ее в лед. Теплота плавления льда (или, что то же самое, замораживания воды) составляет 334 кДж/кг. Отсюда холодопроизводительность машины Кирка

$$Q'_0 = 334 \cdot 4 = 1336 \text{ кДж/ч.}$$

Учитывая необходимость еще и предварительно охладить воду до 0°C , примем $Q_0 = 1400 \text{ кДж/ч}$.

Паровая машина, расходующая 1,6 кг (возьмем среднюю цифру) угля на 0,7457 кДж/с (1 л.с./ч при теплоте сгорания английского угля 30 000 кДж/кг), имеет КПД

$$\eta_{\text{п.м}} = \frac{0,7457 \cdot 3600}{1,6 \cdot 30\,000} = 0,056 = 5,6 \, \%. .$$

Следовательно, паровая машина в час отдавала холодильной машине работу

$$L = 30\,000 \cdot 0,056 = 1680 \text{ кДж.}$$

Отсюда легко определить холодильный коэффициент ϵ (отношение полученного холода Q_0 к затраченной на это работе машины Кирка:

$$\epsilon = Q_0 / L = 1400 / 1680 = 0,83.$$

В идеальном случае по (2.3)

$$L_{ид} = 1400 \frac{T_0 - T_{0с}}{T_0} = 1400 \frac{270^* - 300}{270} = 155,6 \text{ кДж,}$$

а не 1680 кДж.

Следовательно, КПД холодильной машины Кирка

$$\eta_{х.м} = 155,6 / 1680 = 0,093 \text{ или } 9,3\%.$$

Это вполне достойная цифра, если учесть, что лучшие современные аналогичные воздушные машины имеют КПД около 18%. Любопытно отметить, что сравнительно невысокий КПД холодильной машины Кирка все же существенно выше, чем у паровой машины, приводящей ее в движение.

В дальнейшем Кирк разработал другие, еще более совершенные варианты своей машины. Если в первой машине Кирка давление воздуха составляло едва 0,2 МПа, то в новых машинах оно достигало уже 0,6–0,8 МПа. Одна из первых больших машин новой модификации была установлена в 1864 г. на фабрике по производству масла "Юнг, Мелдрум и Бинни". Она работала круглосуточно 10 лет и останавливалась на текущий ремонт только на 1–2 сут через каждые 6–8 мес. Число выпущенных Кирком машин было невелико, но они сыграли важную роль не только в развитии, но и в распространении холодильной техники.

Воздушные холодильные машины в дальнейшем совершенствовались американцем Л. Алленом и немцем Ф. Виндхаузенном.

* Для расчета принимаем температуру, которую должна обеспечить установка, чтобы заморозить воду, $T_0 = 270 \text{ К } (-3^\circ\text{C})$.

Таким образом, к 60-м годам схемы воздушных холодильных установок уже вполне сложились.

К 70-м годам воздушные холодильные машины были довольно широко распространены. П. Гиффорд представил такую машину на Парижскую выставку 1877 г.; с 1880 г. их выпускали серийно в Англии. Особенно широко их использовали для морской транспортировки охлажденной рыбы.

Наиболее высокого совершенства эти машины достигли в варианте, разработанном Джеймсом Големаном. Он по совету В. Томсона основательно занялся этой машиной и в 1877 г. вступил в союз с братьями Белл, предпринимателями, владевшими большими бойнями в Глазго и заинтересованными в транспортировке мяса через океан. Машина отличалась от предшествующих особенно тщательно отработанной конструкцией и большей безопасностью эксплуатации. Она нашла в короткое время широкое распространение. Замечательно, что на этой машине впервые были использованы для регулирования дроссель на паропроводе паровой машины, служившей для привода, и термостат, установленный в охлаждаемом помещении.

В машине применялся противоточный регенеративный теплообменник, в котором воздух, возвращающийся из холодильной камеры, охлаждал сжатый в компрессоре и идущий на детандер воздух.

Эти машины были уже довольно крупными, с мощностью привода до 221 кВт. Многие другие английские фирмы выпускали такие машины и в дальнейшем.

Несмотря на все эти достижения, воздушные холодильные установки к 70–80-м годам почти полностью сошли со сцены. Сработал один из "железных" системных законов научно-технического прогресса – так называемый "закон s-кривой". Сущность его состоит в том, что любое техническое устройство проходит в своем развитии три стадии – поисковую, интенсивного развития и сатурации – насыщения.

Если на графике по оси ординат отложить некую обобщенную качественную характеристику рассматриваемого технического объекта, а по оси абсцисс – время, то ход развития этого объекта во времени изобразится кривой, похожей на букву s.

Первый горизонтальный отрезок этой кривой, расположенный левее точки a, соответствует начальному, поисковому

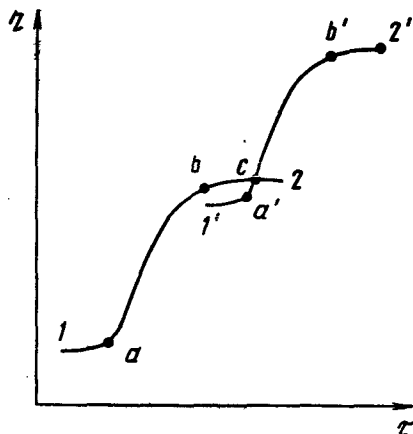


Рис. 3.7. S-Кривая

нический объект дает первые вполне надежные положительные результаты. После этого начинается интенсивное развитие и совершенствование объекта; его конструкция и схема совершенствуются, а характеристики быстро улучшаются. Этому периоду крутого подъема соответствует участок ab .

В конце концов наступает момент, когда из нового (а теперь уже не совсем нового) объекта выжаты почти все его резервы, доступные для реализации на уровне современной техники и технологии. Наступает период сатурации, соответствующий участку $b2$, когда рост качественных показателей замедляется, а затем почти прекращается. Объект еще хорошо выполняет свое назначение и занимает уверенное положение на рынке. Однако научно-технический прогресс продолжает свое неуклонное движение: возникает новая идея, которой суждено пройти, в свою очередь, такой же путь. Новый, молодой объект еще только формируется, ищет пути технической реализации, проходит тот же начальный тернистый путь, что и предыдущий. При этом его первые образцы, как правило, даже хуже, чем отработанные, "вылизанные" изделия старого типа. Поэтому участок $1'a'$ новой кривой проходит ниже; эффективность нового объекта пока еще меньше, чем у старого. Но когда он на-

этапу создания нового объекта техники¹. Работа здесь идет еще наощупь, методом проб и ошибок; на каждом шагу возникают новые проблемы, пути решения которых неясны. Часто опыты заканчиваются неудачей или возникают типичные ситуации, выход из которых удастся найти с трудом.

Если, однако, идея верна, то в конце концов наступает момент, когда основные трудности преодолены и новый тех-

берет силы и наступает период быстрого роста, новый объект быстро обгоняет старый по своим показателям... и судьба технических объектов предыдущего поколения решена — в металлолом или, в лучшем случае, в музей. Дальше история вновь повторяется. Такова диалектика развития поколений техники.

На каждом участке S-кривой нужны разные люди. На первом, поисковом — энтузиасты, главная черта которых — научно-техническая интуиция, умение видеть перспективу, вера в идею и настойчивость. При этом даже необязательны глубокий профессионализм и специальное образование¹. Предприниматели, банкиры и вообще всякое начальство, от которого зависит дать ход новинке или не дать, относятся к предложениям, находящимся на первом этапе, с осторожностью, так как гарантий успеха нет и есть значительный элемент риска.

История работ и злоключений Д. Горри наглядно иллюстрирует этот первый, самый трудный участок S-кривой.

На участке подъема, напротив, нужна уже не столько интуиция, сколько эрудиция. Нужны солидные, хорошо подготовленные профессионалы, могущие "довести" и усовершенствовать конструкцию, знающие технологию, производство и экономику. В истории газовых холодильных установок такими были Кирк, Аллен и Виндхаузен.

Наконец, на третьем этапе (насыщения) не нужны творческие способности никакого вида. Тут, напротив, обычно сторонники старой техники упираются и по возможности стараются "давить" изделия следующего поколения, опираясь главным образом на амбицию, авторитет и скепсис, ибо в отрицании нового других средств нет.

В 70–80-х годах прошлого века с газовыми холодильными машинами вступили в конкурентную борьбу паровые холодильные машины. Сложилась ситуация, соответствующая взаимодействию двух последовательных S-кривых: старой на участке $b2$ и новой на участке $1'a'$.

Воздушные холодильные машины к концу 80-х годов XIX в. из-за больших размеров и энергопотребления, а также

¹ При этом использован обобщающий термин "технический объект" — это может быть машина, аппарат, агрегат и т.п.

¹ Иногда излишняя эрудиция даже мешает творческому воображению; примеры этого в истории науки достаточно многочисленны. В. В. Маяковский со свойственным ему остроумием и афористичностью сказал по этому поводу так: "Чтобы создать что-нибудь стоящее, нужно достаточно мало знать".

массы оборудования должны были уступить рынок новым, более эффективным паровым машинам. Дальше мы увидим, что после первой мировой войны перспективы газовых машин снова возросли, но уже на новой технической основе и в специфических областях применения.

3.3. ПАРОВЫЕ (ПАРОКОМПРЕССИОННЫЕ) ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Идея паровой компрессионной холодильной машины зародилась, по существу, уже тогда, когда впервые вода была охлаждена под колпаком при откачке воздуха насосом. Однако до машины как таковой было еще далеко, так как производилось лишь однократное, а не непрерывное охлаждение. Но и при этом удаление большого количества водяного пара при низком давлении вызывало большие трудности. Чтобы их уменьшить, прибегали даже к тому, что вместо механического насоса стали применять поглощение водяного пара серной кислотой¹. Систематическое исследование получения холода при испарении не только воды, но и легкокипящих жидкостей проводили сначала (1781 г.) Т. Кавалло и позже (1813 г.) А. Маре.

В 1805 г. О. Эванс опубликовал описание машины "для охлаждения жидкостей", в котором предлагалось использовать для этой цели испарение этилового спирта.

Описанная им идея включает почти все принципиально важные для холодильной машины процессы: испарение эфира при низком давлении (под вакуумом), откачку пара насосом (т.е. компрессором) в другой сосуд и конденсацию этого пара холодной водой, отводящей от него тепло. Здесь не хватает только одного важного элемента, который позволил бы замкнуть цикл и вернуть жидкий эфир в сосуд, где он бы мог снова испаряться, охлаждая или замораживая воду.

Для этого был только единственный путь — заставить эфир циркулировать в замкнутом контуре так же, как и в газовой машине.

Первым, кто успешно вступил на этот путь и подготовил условия для продвижения по нему, был англичанин Я. Пер-

¹ Эта, на первых порах малоперспективная, идея тоже содержала рациональное зерно, которое, как мы увидим, потом проросло, дав начало абсорбционным холодильным машинам.

кинс. В августе 1834 г. он получил Британский патент №6662 "Аппарат для производства холода и охлаждающих жидкостей". Эта дата может быть с полным основанием принята как начальная точка отсчета в истории паровых холодильных машин.

Я. Перкинс родился в 1766 г. Получив техническое образование, он всю жизнь работал над совершенствованием паровых машин и накопил большой опыт в этой области. Только в довольно солидном возрасте он по причинам, которые его биографы не могли выяснить, обратился к холодильным машинам, которые в то время не имели какого-либо промышленного значения. Ему было 68 лет, когда он получил свой основополагающий патент на парокомпрессионную холодильную машину с замкнутым контуром. Он прожил еще 15 лет, но реализовать эти идеи ему не удалось, хотя ему, как известному конструктору паровых машин, казалось бы, признание должно было быть обеспечено. Один из его биографов писал: "Нет сомнения, что он заплатил штраф за то, что опередил свое время".

Судьба идей Перкинса обычна; большинство слишком новых предложений не нашли отклика у современников. Однако она уникальна в том смысле, что трудно найти в истории техники человека, который в таком возрасте сделал бы столь важное изобретение, да еще в новой области.

В своем патенте Перкинс предложил собирать испарившееся летучее вещество, затем сжимать его газовым насосом (т.е. компрессором) и после этого снова конденсировать холодной водой, т.е. осуществлять полный цикл, чтобы непрерывно снова получать то же самое количество легколетучего вещества. Эта кажущаяся теперь очень естественной мысль в четкой форме до Перкинса никому не приходила в голову. Он, однако, не ограничился просто выдвиганием идеи, а продумал и ее инженерную реализацию.

На рис. 3.9 показан чертеж из его патента. В изолированном сосуде *a* находится охлаждаемая жидкость. Предусмотрен также сосуд с легкокипящим испаряющимся веществом (испаритель) *b*. В качестве такого вещества Перкинс рекомендовал



Рис. 3.8. Якоб Перкинс

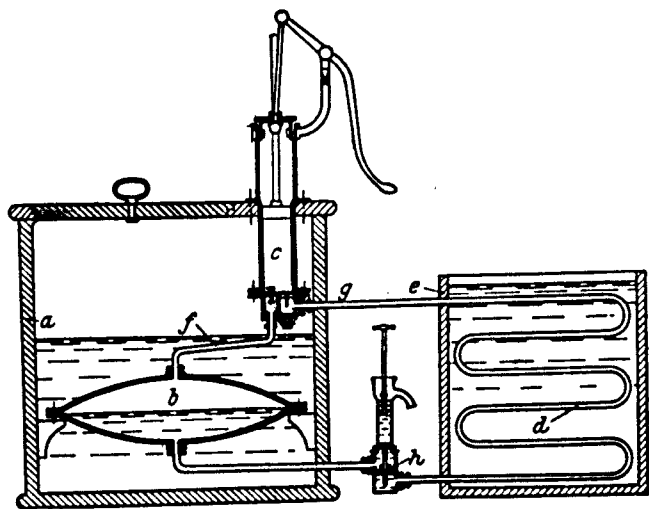


Рис. 3.9. Парокompрессионная холодильная машина Перкинса (схема из патентного описания)

эфир (этиловый эфир), поскольку он дешев и характеризуется невысоким давлением пара. Пары поступают по трубопроводу *f* в паровой насос *c* (т.е. компрессор) и после сжатия подаются по трубопроводу *g* в конденсатор *d*, помещенный в ванну *e* с холодной водой (погружной конденсатор). Здесь пар при давлении, близком к атмосферному, конденсируется, и жидкость через дроссельный клапан *h* возвращается в испаритель. Видно, что здесь полностью предусмотрены все части парокompрессионной холодильной установки. Если весь воздух из машины удалить, она будет исправно работать.

Я. Перкинсу не пришлось увидеть свою машину "в металле". Довольно несовершенная опытная машина по идее Перкинса была сделана уже после его смерти. Ее устройство полностью повторяет эскиз Перкинса (рис. 3.10), но ручной насос заменен уже механическим компрессором. Испаритель выполнен в виде двух соединенных полушарий. В верхний помещается замораживаемая вода, а в междустенное пространство — испаряющийся хладагент. На этой машине удалось получить до

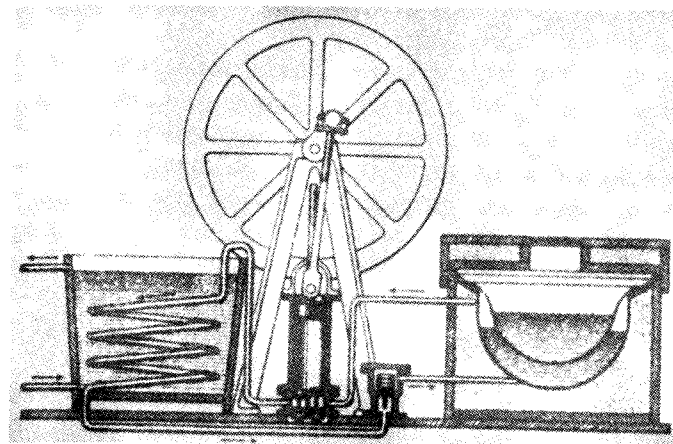


Рис. 3.10. Усовершенствованный вариант машины Перкинса

вольно много льда. Я. Перкинс не был единственным, кто подошел к идее цикла. Похожие мысли высказывали в 30-е годы немец Хазен и англичанин Шоу. Однако их идеи не были столь доработаны. Большого успеха достиг в практическом осуществлении идеи Перкинса А. Твиннинг, с 1848 г. начавший работу с этиловым эфиром. В 1850 г. он получил английский, а в 1853 г. американский патент (№ 10221). Одна такая машина работала в Кливленде и давала 50 кг льда в час.

Наибольший успех в развитии паровых холодильных машин был достигнут Дж. Гаррисоном (родился в 1816 г. в Глазго). Это, несомненно, вторая крупная фигура в истории паровых холодильных машин после Перкинса. Он эмигрировал в Австралию (Сидней) в 1837 г. и поселился вблизи Мельбурна. Был сначала журналистом и издателем газеты, но с 1850 г. занялся проблемами получения холода. Его первая профессия давала возможность быть в курсе главных экономических проблем того времени. Одна из них была связана с потребностью в замораживании мяса, экспортируемого из Австралии в Англию. В период 1856–1857 гг. он получил два основополагающих английских патента (№ 747 и 2362) на машины с этиловым эфиром в качестве хладагента. Правда, он уже обдумывал в это время использование других рабочих тел, в особенности аммиака.

В 1875 г. Гаррисон ездил в Лондон, где обсуждал проблемы охлаждения с Фарадеем и Тиндалем¹.

Наладив производство холодильных машин, Гаррисон занялся непосредственно замораживанием мяса для экспорта в Англию. Однако сначала он попробовал замораживать мясо на берегу в стационарных условиях. В 1873 г. он провел эксперимент в Мельбурне, заморозив посредством своей машины мясо, рыбу и тушки птицы. Через 6 мес. был проведен осмотр и проверка качества. После удачного окончания этой пробы Гаррисон в 1873 г. решился на широкомасштабный эксперимент. Он погрузил на судно "Норфольк", оборудованное его холодильной установкой, 20 т баранины и говядины, заморозил груз на борту, и судно отправилось в Англию. Однако здесь Гаррисона ожидало поражение: машина вышла по дороге из строя и по прибытии в Лондон покупателя на привезенное мясо не нашлось. Гаррисон понес большие убытки, вынужден был оставить коммерческую деятельность и занялся научной работой. Умер он в 1893 г. Машины Гаррисона, работающие на эфире, продолжали несколько лет выпускаться в Лондоне.

Независимо от Гаррисона, Ф. Карре, известный тем, что изобрел совершенно новый и оригинальный вариант паровой холодильной машины (о котором речь будет дальше), разработал паровые холодильные машины не только на этиловом эфире, но и на сернистом ангидриде (французский патент от 27.06.1857).

Одна из установок, построенных по этому патенту, была смонтирована в южной Франции на заводе по производству соли и использовалась при получении сернокислого натрия (глауберовой соли) из морской воды.

Второй научный комментарий. Прежде чем перейти к дальнейшему изложению истории паровых холодильных машин, полезно взглянуть на их эволюцию с общих позиций.

На рис. 3.11 показаны пять схем, характеризующих узловые точки движения по этому пути, занявшему почти столетие. Началось все, как известно, с испарения воды под вакуумом, создаваемым при откачке пара насосом; при этом

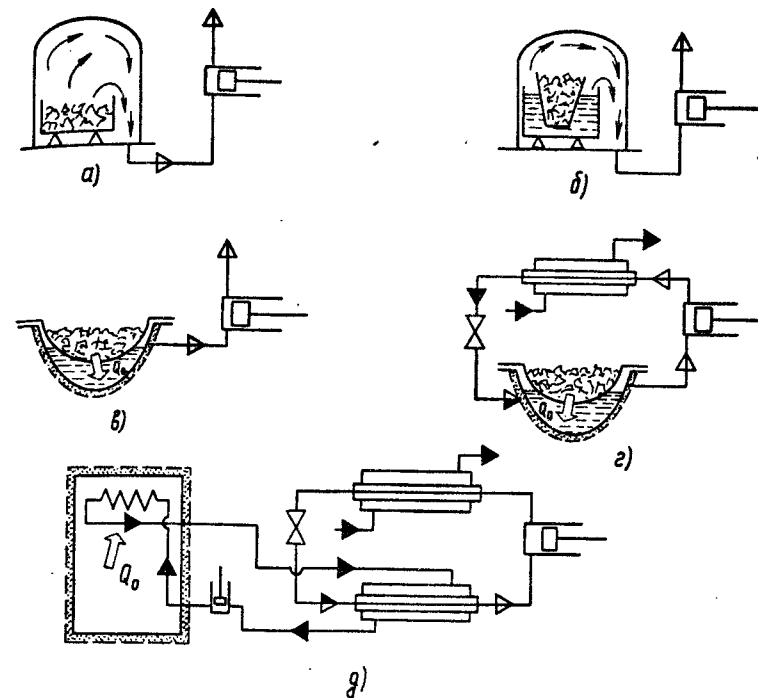


Рис. 3.11. Пять этапов развития парокомпрессионных холодильных установок:

а — испарение жидкости (воды) под вакуумом, создаваемым насосом, откачивающим пар в атмосферу. Жидкость охлаждается и может быть превращена в лед; б — то же, но лед образуется в специальном сосуде (при этом можно применять для испарения другую жидкость); в — то же, но более удобная конструкция; г — откачанный пар не выпускается в атмосферу, а конденсируется при теплообмене с холодной водой и через дроссель возвращается в испаритель (введено принципиальное изменение); д — то же, но холод используется не в испарителе для получения льда, а для поддержания низкой температуры в холодильной камере. В испарителе охлаждается рассол, прокачиваемый через холодильную камеру

вода превращалась в лед. Затем стало ясно, что лучше испарять легкокипящую жидкость (например, эфир); тогда для получения низкой температуры не нужен столь глубокий вакуум. Поэтому и насос, откачивающий пар, будет проще. Лед в этом случае может получаться в специальном металлическом сосуде без откачки его паров. Тепло от воды будет при этом передаваться через стенку сосуда, вокруг которой кипит охлаждающая жидкость.

¹ Характерно, что многие создатели холодильной техники поддерживали связь с тогдашними корифеями науки и консультировались с ними. В числе таких консультантов был наряду с Фарадеем и Тиндалем и В. Томсон-Кельвин (который помогал Големану), Гей-Люссак и др.

Затем исчез и колпак воздушного насоса; установка приняла уже полупроизводственный вид. В сосуде, образованном двумя сферическими поверхностями, кипит под вакуумом легкокипящая жидкость, а в верхней чаше получается лед, который легко удалить и использовать.

Однако и такой вариант не очень хорош. Ведь пары легкокипящей жидкости теряются при откачке и уходят в атмосферу. Появилась гениальная по простоте мысль: сконденсировать их и снова использовать. Для этого после насоса (теперь он превратился в компрессор-машину, которая не только отсасывает, но и нагнетает) устанавливается конденсатор. Это теплообменный аппарат, к тому времени хорошо известный — по существу, такой же конденсатор, как и в паровых машинах. Разница состояла только в том, что в них конденсатор устанавливается после цилиндра машины, в котором пар расширяется до низкого давления, а в холодильной установке, наоборот, после машины, в которой пар сжимается до высокого давления. Это обстоятельство показывает, что паровая холодильная машина — по существу, паровая машина "наоборот".

Дальше возникает вопрос — как наилучшим образом вернуть полученную жидкость в испаритель, чтобы снова получить там холод при ее кипении. Ведь в конденсаторе повышенное давление p_k , созданное компрессором, а в испарителе низкое p_n , созданное им же. Вот на основе этого и появился дроссельный клапан (или вентиль), в котором жидкость дросселируется, охлаждаясь; при этом ее давление снижается, и она поступает в испаритель. Процесс замкнулся: получился цикл. Он полностью соответствует по идее обратному циклу Карно (см. гл. 2). Все отличия связаны лишь с тем, что там работает газ, а здесь пар и жидкость¹.

Последнее усовершенствование связано с устранением необходимости получения льда. Вместо воды в испарителе охлаждают хладоноситель — жидкость, не замерзающую при низкой температуре (например, рассол). Эту жидкость насосом прокачивают через охлаждаемое помещение (камеру), которое может находиться и на значительном расстоянии от холодиль-

¹ Поэтому, строго говоря, более правильно было бы говорить не "паровая компрессионная холодильная установка", а "парожидкостная...", но это слишком длинно.

ной машины. Все дальнейшие усовершенствования ведутся и будут вестись на базе цикла (или циклов) и его обязательных элементов: компрессора, конденсатора, дросселя и испарителя.

Назначение каждого из них очевидно и не нуждается в комментариях. Следует только напомнить, что дроссель в парожидкостном цикле играет ту же роль, что и детандер в газовом; он обеспечивает внутреннее охлаждение, т.е. необходимое понижение температуры рабочего тела без какого-либо постороннего отвода тепла. Этот эффект (как и в газовом цикле) обеспечивается за счет "срабатывания" разности давлений p_k и p_n , которые создает компрессор.

Какими же должны быть эти давления? Все зависит от двух факторов. Первый из них — это температуры в испарителе T_n и конденсаторе T_k . Значение T_n определяется температурой того объекта, который нужно охладить. Если, например, мясо нужно поддерживать при температуре -10°C (263 K), то T_n должно быть на несколько градусов ниже, например -15°C (258 K). Иначе ничего не получится — ведь то, чем охлаждают, должно быть обязательно холоднее, чем то, что охлаждают.

Аналогично в конденсаторе, где тепло отводится в окружающую среду, температура T_k должна быть несколько выше, чем в охлаждающей воде или воздухе. Что касается давлений p_k и p_n , то они при данных T_k и T_n зависят от природы того вещества, которое используется в качестве рабочего тела холодильной машины. Второй фактор связан с тем, что для каждого вещества существует зависимость температуры испарения (и соответственно конденсации) от давления.

На рис. 3.12 показана такая зависимость для четырех веществ: этилового эфира $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$, метилового эфира $(\text{CH}_3)_2\text{O}$, сернистого ангидрида (диоксид серы) SO_2 и аммиака NH_3 .

Из графика видно, что при использовании этилового эфира давление в конденсаторе при температурах T_k и T_n , приведенных выше, будет меньше атмосферного $p_{0,c}$.

Это при малейших неплотностях может привести к подосу воздуха в систему и нарушению ее работы (не говоря уже о возможности взрыва смеси эфира с воздухом). Поэтому одной из задач создателей холодильных машин было устранение этой опасности. Тут было два пути. Первый — замена используемого этилового эфира на такое рабочее тело, которое имело бы большее давление при тех же (или близких) температурных

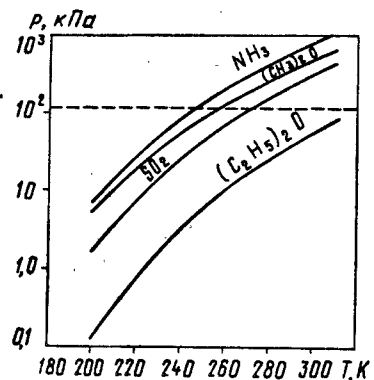


Рис. 3.12. Зависимость температуры перехода пара в жидкость и обратно от давления для четырех рабочих тел парокомпрессионных холодильных установок

условиях [откуда переход к $(\text{CH}_3)_2\text{O}$, SO_2 или в дальнейшем к NH_3]. Второй – чисто конструктивный – обеспечение герметичности. При этом трудности были связаны, главным образом, с конструкцией уплотнений в подвижных элементах компрессора.

Не менее важной заботой конструкторов было регулирование машины. Удобнее всего это было делать, меняя размер сечения для прохода рабочего тела через дроссель, в зависимости от необходимых холодопроизводительности и температуры $T_{\text{н}}$. Наконец, часто возникали ситуации, когда нужно было обеспечить охлаждение одного или нескольких помещений или объектов, находящихся на значительном расстоянии от холодильной машины. Тащить туда испаритель вместе с хладагентом было, естественно, нежелательно. Поэтому была придумана схема с циркуляцией хладоносителя (например, рассола), не замерзавшего при низкой температуре. Рассол охлаждался в испарителе, а затем циркулировал между установкой и потребителями (см. рис. 3.11).

Решением всех этих задач и занимались создатели новых холодильных машин.

Машины Карре имели ряд интересных особенностей. Из них нужно отметить две. Первая относилась к компрессору (рис. 3.13): он был двойного действия, имел охлаждающую рубашку, позволяющую отводить часть тепла сжатия непосредственно в цилиндре, и усовершенствованную набивку сальника¹, препятствующую подосу воздуха. Вторая относилась к дроссельному вентилю; он был герметичным и регулировался

¹ Термин "сальник" происходит от сала, которым смазывали его набивку.

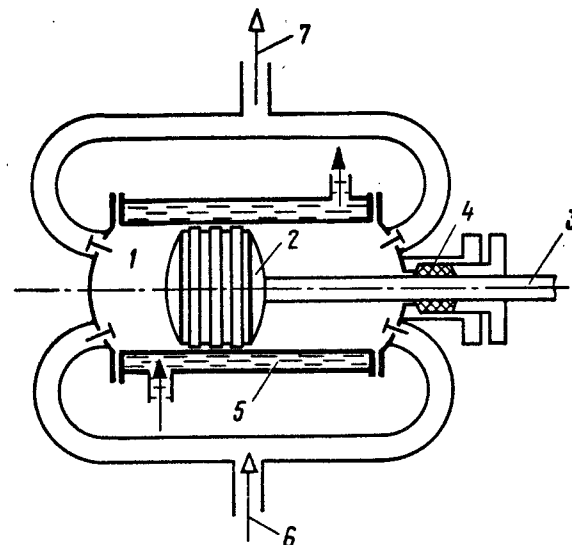


Рис. 3.13. Схема поршневого холодильного компрессора двойного действия:

1 – цилиндр; 2 – поршень; 3 – шток; 4 – сальник; 5 – охлаждающая водяная рубашка; 6 – всасывающий патрубок; 7 – нагнетательный патрубок

автоматически изнутри посредством мембраны, на которую давили пары хладагента. Если давление в испарителе возрастало (т.е. повышалась температура кипения), мембрана, действуя на клапан, прикрывала его. Давление в испарителе падало, и соответственно снижалась температура. Это был один из первых в истории техники автоматический регулятор с отрицательной обратной связью! Первым был известный регулятор Уатта.

Что касается перехода на другие, более удобные рабочие тела и отказа от этилового эфира, то здесь нужно отметить Х. Телье (1828–1913 гг.), который разработал машины, где заменил этиловый эфир на метиловый. Давление тогда стало намного больше (0,177 МПа при -10°C , 0,605 МПа при $+25^\circ\text{C}$). Но наиболее подходящим рабочим телом, с его точки зрения, был аммиак (об аммиаке он писал еще в 1867 г. в брошюре "Аммиак в промышленности"). Он также задумал и осуществил первую линию для охлаждения пива на пивоваренном заводе.

Решающий шаг, который определил победу паровых холодильных машин над газовыми в 80–90-х годах прошлого века,

связан с работами К. Линде. Значительная часть крутого подъема, характерного для средней части s -кривой (см. рис. 3.7), была создана им.

К этому времени термодинамика, развитие которой началось с труда С. Карно и продолжалось трудами Клаузиуса и Томсона, развилась настолько, что могла стать научной базой холодильной техники. В то же время она достигла уровня, при котором не могла дальше успешно развиваться без научной базы только на основе экспериментального проектирования.

К. Линде сумел не только соединить теорию с практикой в области холодильных машин, но и, как мы увидим в гл. 4, был первым среди тех, кто заложил основы технической криогеники.



Рис. 3.14. Карл Линде

Карл Линде родился в 1842 г. в Берндорфе (Верхняя Франкония, Германия). До 1861 г. он посещал гуманитарную гимназию, а с 1861 по 1864 г. учился в Цюрихском политехническом институте. Преподавание в этом учебном заведении стояло на очень высоком уровне; достаточно назвать среди профессоров такие имена, как Дедекинд (математика), Клаузиус (физика), Цейнер (теория машин) и Рело (механика). К. Линде уже тогда особое внимание уделял термодинамике – базовой науке для всей низкотемпературной физики и техники. С 1864 по 1868 г. он работал в промышленности, на паровозном заводе, где прошел практическую инженерную школу.

Когда в 1868 г. в Мюнхене была организована Высшая техническая школа, он, несмотря на то, что ему было 26 лет, был приглашен туда как экстраординарный профессор по курсу машиностроения. Через четыре года он был уже ординарным профессором в Дармштадте, откуда возвратился в Мюнхен и оставался на должности профессора до 1879 г. Этот период его жизни был чрезвычайно плодотворным. Он работал одновременно в трех направлениях: научном, инженерно-конструкторском и как предприниматель-организатор¹ (не говоря уже о педагогической деятельности).

В 1870 г. он опубликовал основополагающую работу "Об отводе тепла при низких температурах механическими средствами" (в переводе на современный язык – "О холодильных машинах"). В ней, по существу, впервые был проведен термодинамический анализ обратных циклов. К. Линде показал, что ни одна из холодильных машин, построенных и испытанных к этому времени, еще не достигла КПД, равного 20%. Констатация этого грустного факта одновременно давала и вдохновляющий стимул. Из него следовало, что в принципе можно еще повысить эффективность холодильных машин в 4 раза! В новой работе 1871 г. "Усовершенствование льдоделательных и холодильных машин" (уже через год!) он исследовал пути, по которым нужно двигаться, чтобы использовать в пределах технических возможностей эти резервы и достигнуть лучших результатов. Одновременно с этим Линде сумел добиться усовершенствования производства пива в результате отказа от природного льда и перехода на холодильные машины (рис. 3.15). Об этом он в 1873 г. с успехом доложил на Международном конгрессе пивоваров в Вене.

К. Линде вначале использовал, как и Гаррисон и Телье, в своих холодильных машинах метиловый эфир, но в отличие от них не только взвешивал и обсуждал возможность перехода на аммиак, но и реализовал ее. Первая из аммиачных

¹ Эти годы (70–80-е годы) были в Германии периодом быстрого промышленного подъема, вызвавшего появление людей, сочетавших в себе инженерно-научные и предпринимательские способности. Особенно крупными фигурами среди них были (кроме К. Линде) братья Сименсы (о В. Сименсе мы уже упоминали раньше; другой брат – крупный электротехник – был организатором концерна "Сименс", существующего до сих пор) и не менее известный оптик Карл Цейсс.

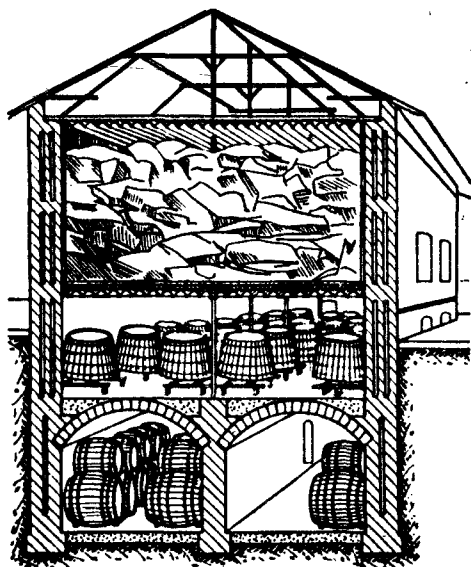


Рис. 3.15. Склад льда для брожения и хранения пива

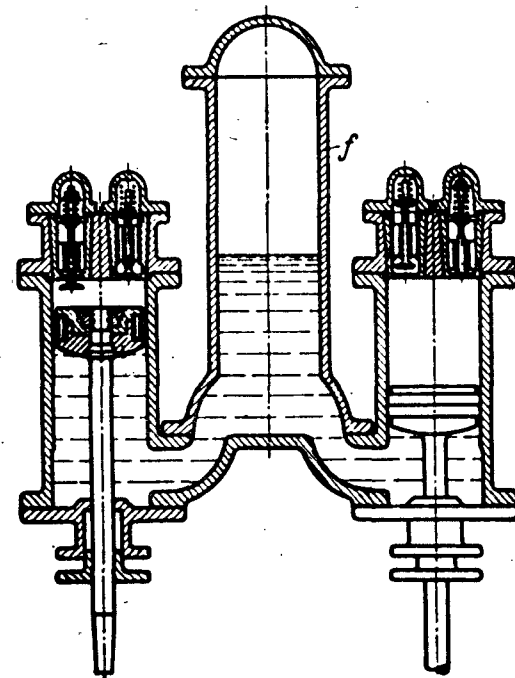
машин была сделана в 1876 г. Ее компрессор показан на рис. 3.16. Одна из машин этой серии работала с 1877 по 1908 г. (31 год!) на пивозаводе в Триесте; сейчас она находится в Техническом музее Вены.

К. Линде непрерывно совершенствовал конструкции компрессоров и остального оборудования холодильных машин на аммиаке и продавал лицензии как в Германии, так и в других странах (Швейцарии, Бельгии, Англии, США).

Промышленное развитие дела, которое он начал, скоро приняло такой размах, что Линде вынужден был в 1879 г. отказаться от профессорской деятельности. В этом же году он стал во главе вновь организованной фирмы¹ в Висбадене, которую он лично вел до 1890 г. После этого К. Линде вернулся к научной деятельности, переключившись уже на криогенную технику. Его изобретения в области ожижения воздуха и получения низких температур открыли, по сути, криотемпературам путь в технику и технологию. Они были настолько успешными, что заставили Линде организовать в 1895 г. особое отделение фирмы в Мюнхене, которое было предназначено только для производства криогенной техники. К. Линде умер в 1934 г. в возрасте 93 лет. О работах Линде в области криогенной техники и низкотемпературной термодинамики будет подробно рассказано в гл. 4.

¹ "Общество льдоделательных машин Линде" (традиционная терминология — по существу это были, конечно, холодильные машины). Фирма Линде существует и успешно действует до сих пор.

Рис. 3.16. Аммиачный вертикальный холодильный компрессор Линде (чтобы избежать утечки аммиака через сальники, использован хитрый прием: под поршнями помещена запорная жидкость — масло; колпак *f* служит для компенсации изменения уровня масла при работе поршней)



К 80–90-м годам прошлого века фирмы, выпускающие холодильные машины, возникали одна за другой — и в Европе, и в США; их продукция распространилась по всему миру.

В это время воздушные машины исчерпали на уровне машиностроительной техники тех лет свои возможности, а парокомпрессионные сначала догнали их по экономичности, а потом и превосходили. Их последние модели были компактнее, имели лучшие энергетические характеристики, особенно в области умеренно низких температур до $-(10+20)^{\circ}\text{C}^*$.

Как и должно быть в таких ситуациях, борьба двух направлений техники велась не только на потребительском рынке, но и в острых научно-технических дискуссиях. Они шли и в научно-технической литературе, и на съездах, и на конференциях. Доводы о преимуществах паровых холодильных машин перед газовыми выдвигались еще в конце 60-х годов. Однако сторон-

* Более низкие температуры, где воздушные машины сохраняли некоторые преимущества, не были нужны в это время никому из потенциальных потребителей холода. Они появились значительно позже: об этом будет сказано в гл. 4 и 5.

ники газовых машин успешно защищались. В частности, они указывали (например, уже упоминавшийся Кирк) на огне- и взрывоопасность хладагентов паровых холодильных машин. Кроме этого, столь же справедливо говорилось в дальнейшем и о ядовитости новых хладагентов (SO_2 и NH_3) и их корродирующем действии на конструкционные материалы. Все это было справедливо. Однако сторонники паровых машин не отступали. Среди них был и К. Линде, который выступил на эту тему на уже упоминавшемся конгрессе пивоваров в Вене. В частности, Линде указал на громоздкость газовых машин, связанную с большим объемом перекачиваемого газа, и необходимость иметь две машины (компрессор и детандер) одна из которых к тому же работает при низких температурах. Кроме того, был неопровержим главный довод – намного больший расход энергии у газовых машин. Что касается неприятных свойств хладагентов, то устранение связанных с ними неприятных последствий – дело техники: нужно (и можно) устранить утечки и взять нужные конструкционные материалы.

В конечном счете победили и завоевали большую часть рынка парокомпрессионные холодильные машины, хотя нашлось место для газовых и других, изобретенных в это же время и позже. Однако, прежде чем вернуться к ним в гл. 6, нужно уделить внимание и криогенной технике.

Глава четвертая

ОТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ФИЗИКИ К КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКЕ (вторая половина XIX – начало XX в.)

Нет ни одного научного открытия,
которое рано или поздно не получило бы
практического применения.

Ф. Жолио-Кюри

4.1. КРИОГЕННАЯ ТЕХНИКА ДОГОНЯЕТ ХОЛОДИЛЬНУЮ

Основные направления холодильной техники к 80-м годам прошлого века вполне сформировались. В связи с интенсификацией международной торговли и ростом городов нарастала потребность в крупномасштабных перевозках и длительном хранении пищевых продуктов. Накопился и существенный

инженерный опыт конструирования и эксплуатации холодильных машин. Все, что необходимо для развертывания широкого промышленного производства холодильной техники, было подготовлено. Другими словами, холодильная техника вышла на линию крутого подъема s-кривой.

Совсем иная ситуация была в криогенике. "Младшая сестра", как ее долгое время называли холодильщики, к началу 80-х годов, хотя и подавала большие надежды, еще очень мало умела по сравнению со "старшей". Температур, при которых происходит ожижение кислорода и азота, удалось достигнуть в опытах Кайете и Пикте. Это разрушило "психологический барьер"; было доказано, что такое ожижение возможно. Однако до практического применения температур ниже $-(140+150)^\circ\text{C}$, как и ожижения "постоянных" газов, было еще далеко. Исследования в этой области пока интересовали больше физиков, чем инженеров, не говоря уже о потенциальных потребителях такого рода продуктов.

Тем не менее результаты Кайете и Пикте дали сильный толчок работам в области ожижения "постоянных" газов. Нужно было "только" для начала хотя бы ожижить кислород или азот, но так, чтобы получить их не только в устойчивом состоянии, но и в количествах, позволяющих изучить их свойства. Попросту говоря, нужно было иметь сосуд, в котором, как в стакане с водой, плескался бы хоть какой-нибудь ожиженный газ из шестерки "неподдающихся".

Первыми, кто решил эту задачу, оказались, как это ни странно на первый взгляд, не кто-либо из членов Лондонского Королевского общества, Парижской академии или другого прославленного научного сообщества. Ими стали два еще мало известных польских профессора: Зигмунд Вроблевский и Кароль Ольшевский из Краковского университета.

Чем же объяснить, что на востоке Европы, в стране, которая в то время не существовала в качестве самостоятельного государства, в университете, который не имел сложившейся научной школы, стал возможен такой рывок? Ведь ожижение кислорода и азота, которое осуществили в 1883 г. Вроблевский и Ольшевский, было крупной научной сенсацией, всколыхнувшей ученый мир!

Разумеется, это не было случайностью. Как всегда в таких событиях, здесь удачно сочетался целый ряд факторов, сов-

местное действие которых и дало, на первый взгляд, неожиданный результат. Разобраться в них и поучительно, и интересно.

Определяющую роль, конечно, сыграли выдающиеся личные качества как Вроблевского, так и Ольшевского; они хорошо дополняли друг друга. Первый обладал, прежде всего, высокой физической интуицией, основанной на фундаментальной подготовке. Хотя он и имел опыт экспериментатора, эта сторона не была определяющей. Второй, напротив, был выдающимся мастером в области экспериментальной техники, что, разумеется, сочеталось с широким научным кругозором, особенно в области низких температур.

Другим немаловажным фактором были традиции и общая обстановка, дух Краковского (Ягеллонского) университета. Этот один из старейших университетов Европы был основан королем Казимиром еще в 1364 г., а затем реорганизован по образцу Парижского Владиславом Ягайло, откуда и получил свое название. Хотя в XIX в. он не считался одним из самых передовых в Европе по естественным наукам, еще жили и поддерживались традиции, связанные с именем самого Н. Коперника, который учился в нем с 1491 по 1495 г. Руководители института стремились возродить славу университета и поддерживали то, что могло ей способствовать. Важно и то, что Краков издавна находился в центре наиболее промышленно развитого района Польши и даже после ее раздела имел определенную автономию ("Краковская республика", существовавшая до 1843 г.).

Все эти обстоятельства отражались на характере преподавания естественных наук и направлении исследований в университете.

Наконец, еще одним немаловажным фактором, способствовавшим успеху работ Вроблевского и Ольшевского, являлось международное научное сотрудничество, проявившееся в тех разнообразных знаниях и опыте, которые они получили в различных научных школах Европы. Из приведенных далее сведений из биографий каждого из них видно, в скольких университетах и лабораториях они учились и работали, не говоря уже о международных научных связях, которые постоянно ими поддерживались.

Биографии как Вроблевского, так и Ольшевского, несмотря на существенное различие их судеб, объединяет участие в одном общем событии – Польском освободительном восстании 1863 г.

После третьего раздела Польши между Австрией, Пруссией и Россией в 1795 г. она перестала существовать как самостоятельное государство. Юго-западная часть Польши, в том числе район Кракова, отошла к Австро-Венгрии, восточная и центральная с Варшавой – к России, а западная – к Пруссии.

Борьба за восстановление Польского государства неоднократно приводила к восстаниям. Все они закончились неудачно. Самыми крупными из них были три – в 1794 г. (восстание под руководством Костюшко), в 1830 г. и в 1863–1864 гг.

И Вроблевский, и Ольшевский участвовали в восстании 1863 г., и на их жизненном пути это сильно сказалось, но по-разному.

Зигмунд Вроблевский родился в 1845 г. в Гродно. В 1862 г. после окончания гимназии с серебряной медалью он поступил на физико-математический факультет Киевского университета. В это время Киевский университет Святого Владимира, основанный в 1834 г., был одним из крупных научных центров России. Казалось, все шло хорошо, по намеченному пути. Однако следующий, 1863 г. стал переломным в его судьбе. Находясь в Гродно, он принял участие в январском восстании. После его разгрома царскими войсками Вроблевский был арестован и просидел 16 мес. в тюрьме – сначала в родном городе, а затем в Варшаве. Судом он был приговорен к ссылке в Томск, куда был отправлен по этапу. В Томске Сигизмунд Антонович, как его звали в русском варианте, провел четыре года – с 1863 по 1868 г. Поддерживал свое существование на сносном уровне он тем, что давал уроки. Одновременно он учился и сам: Томск был единственным в Сибири университетским городом, и молодой поляк пользовался симпатией и поддержкой местной интеллигенции. По ходатайству родителей "государственный преступник Вроблевский" был переведен ближе к родине – в уездный городок Казанской губернии Цивильск. Пребывание здесь было, пожалуй, самым трудным временем ссылки; несмотря на большую относительно Азии близость к Европе, жизнь в затхлой провинциальной обстановке Цивильска была после Томска очень тяжела, тем более что в тюрьмах Вроблевский повредил зрение, и болезнь прогрессировала. Наконец, в 1869 г. по манифесту Александра II он был помилован и вернулся в Варшаву. Следующий год он провел в Берлине, где знаменитый офтальмолог Грефе сделал ему две операции и частично восстановил зрение. После этого мож-



Рис. 4.1. Зигмунд Вроблевский



Рис. 4.2. Кароль Ольшевский

но было вернуться к изучению наук – теперь уже в Берлинском университете. Жил студент Вроблевский в бедности, поддерживаемый небогатыми родителями и литературными заработками (писал научно-популярные статьи для русской газеты "Сын Отечества").

Склонность к научной работе проявилась у Вроблевского еще во время пребывания в ссылке. В Цивильске (ему было в это время 23 года) он разработал свою собственную космогоническую теорию, в которую вложил много сил и энтузиазма. По приезде в Германию он первым делом представил ее на суд корифеев науки. Теория Вроблевского была, по-видимому, не очень удачной, и это вполне естественно. Ее автор еще не имел достаточных знаний, а Цивильск был не самым подходящим местом для такой работы, требующей научных консультаций и обсуждения.

В августе 1871 г. Вроблевский представил эту работу в Гейдельберге знаменитому физическому профессору Кирхгофу, который, однако, не пожелал "заниматься этими глупостями". Следующий этап был в Бонне у еще более знаменитого профессора Клаузиуса, где прием был еще менее благосклонным. Будь на месте Вроблевского кто-нибудь другой, на этом дальнейшая борьба могла прекратиться. Но он решил все же сделать еще одну попытку и обратился в Берлине к третьему, не менее знаменитому профессору Г. Гельмгольцу.

В отличие от своих ученых коллег, Гельмгольц внимательно прочитал записку Вроблевского и смог разглядеть за юношес-

кими фантазиями и горячностью задатки незаурядного исследователя. Он не сделал никаких резких замечаний, а предложил Вроблевскому поработать в его лаборатории и указал на ряд опытов, могущих прояснить дело. Это спокойное и доброжелательное отношение помогло Вроблевскому без психологической травмы понять свои ошибки, "спуститься с небес на землю" и всерьез заняться физикой. Два семестра он работал в лаборатории Гельмгольца и прошел там школу, которая превратила юного революционера и ниспровергателя устаревших астрономических теорий в настоящего физика-экспериментатора¹.

С этого времени начинается стремительный научный рост З. Вроблевского. Он переселяется в Мюнхен и в 1879 г. сдает экзамен и получает степень доктора философии "summa summa laude"². Затем он становится ассистентом кафедры физики в Страсбургском университете, где делает работу по диффузии газов, заслужившую лестный отзыв самого Максвелла в авторитетнейшем английском журнале "Nature". После этого он был приглашен на кафедру физики Ягеллонского университета, при поддержке членов которого был предварительно командирован на год в Париж, в Высшую Нормальную школу (самое престижное высшее научное учебное заведение Франции, готовящее преподавателей и научных работников). Здесь он работал у профессора Сен-Клер Девиля с установкой Кайете, изучал поведение CO_2 при низких температурах и взаимодействие его с водой. С этого времени Вроблевский породнился с физикой и техникой низких температур и остался верен им до самой смерти.

¹ Читатель, возможно, обратил внимание на то, что в книге нигде не встречаются слова "ученый" применительно к человеку, профессионально занимающемуся научной работой. Автор действительно исключает такую трактовку этого слова. Ученый – это просто человек, которого много учили. Результат такого учения может быть самым разным. Поэтому ученость и способность к творческой научной работе – далеко не всегда совпадают. Как говорил академик Ландау: "Ученым может быть и пудель". Английское слово scientist (от science – наука) больше подходит; но, к сожалению, в русском языке аналогичного термина пока нет.

² Степень доктора философии означала "принадлежность к достойным похвалы"; она соответствовала примерно нашему кандидату наук.

С 1882 г. он был избран заведующим кафедрой физики Ягеллонского университета.

Кароль Ольшевский родился в Броникове (Галиция) на год позже Вроблевского – в 1846 г. Это обстоятельство сыграло в его судьбе важную роль; он был слишком молод, чтобы принять активное участие в восстании 1863 г. Только, еще будучи гимназистом, он стал членом подпольной организации, готовящейся к восстанию. Поэтому Ольшевский лишь ненадолго был посажен австрийской полицией в Краковскую тюрьму, но вскоре был отпущен и вернулся в гимназию, чтобы ее закончить. Этот краткий эпизод не идет ни в какое сравнение с тем, что пришлось выдержать Вроблевскому. И в дальнейшем, как мы увидим, жизнь Ольшевского складывалась менее драматично, чем у его коллеги (в чем, естественно, нет никакой вины).

Он поступил в Ягеллонский университет. Уже там на него как на способного студента, обратил внимание директор химической лаборатории, который предложил ему быть демонстратором опытов. Затем Ольшевский стал ассистентом и, получив стипендию, отправился повышать квалификацию в Гейдельбергский университет, где слушал лекции Бунзена и Кирхгофа (это был тот самый Кирхгоф, который отказался заниматься "глупостями" Вроблевского). В Гейдельберге Ольшевский стал доктором и, возвращаясь в Краков, побывал в научных лабораториях Германии и Австрии. В 1876 г. он становится профессором, а затем – заведующим кафедрой химии Ягеллонского университета.

Еще до перехода Вроблевского в университет Ольшевский более 10 лет работал над усовершенствованием лабораторного оборудования, в том числе и низкотемпературного, предназначенного для ожижения газов, и приобрел в этой части большой опыт. Когда в 1882 г. в университете появился новый заведующий кафедрой физики, между двумя молодыми профессорами (одному было 35, другому – 36 лет) сразу же установился тесный контакт. Они – теоретик, понимавший эксперимент, и экспериментатор, владевший теорией, – хорошо дополняли друг друга, и оба стремились ожить кислород до получения жидкости, а за ним и другие "постоянные" газы.

Базой для экспериментов послужила установка Кайете, которая уже выпускалась в это время в Париже фирмой

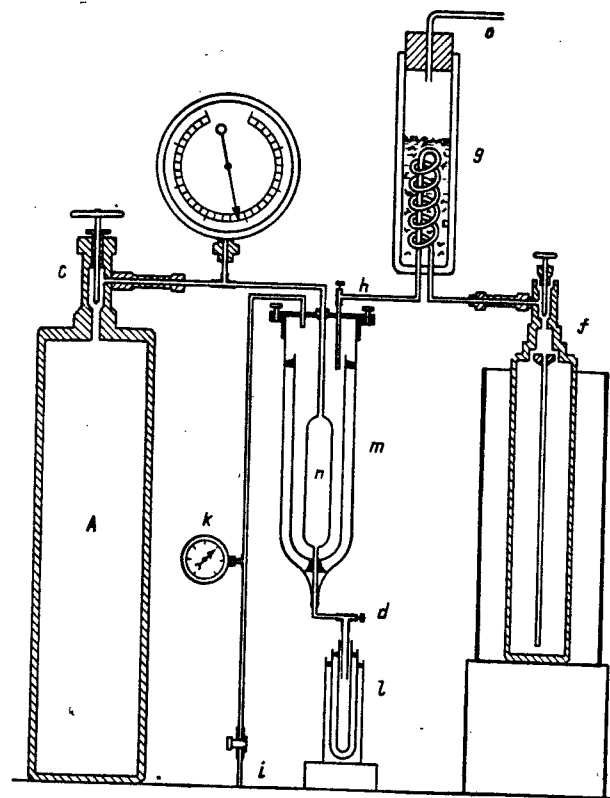


Рис. 4.3. Установка Вроблевского и Ольшевского для ожижения кислорода

"Дюкрете". Она была закуплена Вроблевским, который имел некоторый опыт работы с ней.

Началась интенсивная совместная работа, и уже в начале следующего, 1883 г., желаемый результат был достигнут. Впервые в истории 29 марта 1883 г. был получен жидкий кислород.

3. Вроблевский и К. Ольшевский сделали, по существу, только один шаг вперед относительно своих предшественников, но это был шаг, обеспечивший принципиальное изменение, качественный скачок.

В чем же было отличие их аппаратуры от тех установок, которыми пользовались Кайете и Пикте? Чтобы это понять, проще всего рассмотреть устройство первого из сконструированных ими аппаратов (рис. 4.3).

Кислород, предназначенный для ожижения, находится под давлением в баллоне А. При открывании вентиля с он мог быть направлен в небольшой сосуд – ампулу л, служащую для его ожижения. Давление кислорода в ней, измеряемое манометром, можно посредством вентиля с поддерживать на нужном уровне. Ампула л помещена в двухстенный цилиндр т, в который через вентиль h может подаваться жидкий хладагент (в данном случае этилен) из баллона f, погруженного в смесь льда с NaCl. Дальнейшее охлаждение этилена происходит "смесью Тилорье" $\text{CO}_2 + (\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$ в змеевике, находящемся в сосуде g. Если это охлаждение необходимо произвести под вакуумом, то газ откачивается насосом через трубку о. Жидкий этилен, окружающий сосуд л, кипит под вакуумом, так как его пары откачиваются через трубку i. Вакуумметр k измеряет давление пара этилена и таким образом дает возможность точно знать температуру кипящего этилена. Если это давление соответствует $3,3 \cdot 10^{-4}$ МПа (2,5 мм рт. ст.), то температура будет примерно -136°C , а при $1,3 \cdot 10^{-4}$ МПа (1 мм рт. ст.) она будет около -152°C . Очевидно, что кислород в ампуле а легко ожижится при сравнительно невысоком давлении до 2 МПа, что и произошло.

Предание говорит, однако, что этот долгожданный момент наступил не сразу. Истомившись от ожидания, Вроблевский и Ольшевский решили пойти в кафе, оставив у аппарата своих помощников, и когда вернулись, увидели, что победа, наконец, пришла! Экспериментаторы наблюдали, как на стенках ампулы л образуются мелкие капли жидкого кислорода, стекающие вниз и собирающиеся на дне. Можно представить, что они при этом чувствовали!

Полученную жидкость через трубку, открыв вентиль d, можно слить в открытый сосуд l. Часть ее при дросселировании до атмосферного давления испаряется, но оставшееся количество вполне достаточно для исследования.

Из описания ясно видны отличия установки Вроблевского и Ольшевского от устройства их предшественников. Одно из них имеет своеобразный характер: польские исследователи отказались от обоих основных способов внутреннего охлаждения – и дросселирования газа, которое применял Пикте, и адиабатного расширения по Кайете. В определенном смысле это был шаг назад, поскольку в дальнейшем техника ожижения газов пошла по направлению использования именно эти

двух принципов (а холодильная техника к этому времени уже полностью перешла на них). Однако это был такой шаг назад, который позволил сделать тут же более мощный рывок вперед. Он дал возможность сосредоточить силы на старых, испытанных еще Фарадеем способах – растворении и испарении и "выжать" из них намного больше, чем удавалось раньше. Если отвлечься от второстепенных деталей, то станет очевидным, что причина "полуудачи" и Кайете, и Пикте состояла в том, что температуры испарения хладагентов в ступенях предварительного охлаждения были недостаточно низкими. Для того чтобы добиться цели, нужно было намного понизить давление отсасываемых паров. В конечном счете еще существовал и действовал оставшийся от прежних времен стереотип: "сильнее сжать, а охлаждением помочь". Вроблевский и Ольшевский его преодолели, глубже поняв работы Менделеева и Эндрюса. Действуя по обратному принципу – "сильнее охладить, а давлением помочь", они достигли положительного результата.

Секретарь Парижской академии, тот же Дебре, который первым узнал о результатах Кайете и Пикте, 9 апреля 1883 г. получил телеграмму: "Жидкий кислород получен, он бесцветен, как угольная кислота¹, через несколько дней получите сообщение".

Надо заметить, что в определении цвета жидкого кислорода его "родители" ошиблись. Он на самом деле голубоватый, а в толстом слое имеет очень красивую интенсивно голубую окраску. Но, располагая малым количеством жидкости, ее можно и не увидеть.

3. Вроблевский и К. Ольшевский сделали 16 апреля совместный доклад на собрании Парижской академии. Их достижение, таким образом, было официально признано научным сообществом.

Вернувшись в Краков, они, окрыленные успехом, "с ходу" решили ожижить еще два "неподдающихся" газа – азот и оксид углерода. Но из этого ничего не получилось. Нужна была более низкая, чем для кислорода, температура, и кипящий этилен уже не годился. Но Вроблевскому пришла мысль использовать для этой цели полученный жидкий кислород, со-

¹ В то время так называли диоксид углерода.

здавая вакуум уже над ним. Аппаратуру быстро доработали, через две недели был сконденсирован азот, а затем оксид углерода и воздух. Была даже мечта сделать с кислородом то же самое, что в 1775 г. произвел В. Гюллен с водой, превратив ее в лед.

Однако этого сделать не удалось; до температуры затвердевания кислорода (~ 56 K) было еще далеко.

Совместные работы Вроблевского и Ольшевского, которые привели к серии столь крупных достижений, продолжались всего полгода; в октябре 1883 г. их содружество неожиданно закончилось. Оба стали работать самостоятельно в разных лабораториях (первый – в физической, второй – в химической). Причина этого разрыва так и осталась неизвестной. Никто из них никогда не высказывал третьим лицам или в печати каких-либо претензий или тем более обвинений по адресу своего коллеги. Не было и довольно часто встречающихся в ученых кругах споров о приоритете, в высказывании той или иной идеи или в каком-либо открытии, изобретении. Оба они держались по-рыцарски.

3. Вроблевский продолжал интенсивно работать, подготавливая как экспериментальную, так и теоретическую базу для сжижения водорода и одновременно изучая свойства веществ, в частности электропроводность, при низких температурах. Он стал членом нескольких академий и деканом физико-математического факультета. Уже в одиночку он занялся определением критической температуры водорода, что должно было дать в дальнейшем точный ориентир для его сжижения. В результате экспериментов он получил данные для уравнения состояния водорода и определил его критическую температуру равной 30 K. Это значение, близкое к действительному (~ 33 K), показывало, что получение жидкого водорода намного труднее, чем азота и кислорода, и что для этого нужна новая аппаратура. Эти последние результаты стали известны из бумаг Вроблевского, когда его уже не было в живых.

Занимаясь поздно вечером в лаборатории, он прилег отдохнуть на диван, возле которого стояла керосиновая лампа. Неосторожным движением во сне он опрокинул лампу на себя и, когда проснулся, был уже объят пламенем. Вроблевский выбежал во двор, где огонь сбили. Были приняты все возможные меры, но спасти его не удалось. Через несколько дней – 16 апреля 1888 г. Вроблевский умер от последствий ожога.

К. Ольшевский прожил еще долгие годы (он умер в 1915 г.), неустанно работая в той же избранной с самого начала области и совершенствуя криогенное оборудование со своими помощниками и мастерами. Среди последних особо выделялся университетский механик В. Гродзинский, организовавший в 90-х годах фирму, изготавливавшую под научным руководством Ольшевского для многочисленных заказчиков из разных стран лабораторные аппараты для сжижения кислорода, воздуха и водорода. Эти аппараты постоянно совершенствовались и были лучшими для своего времени. К. Ольшевский использовал и все новое, что делалось в других странах, в частности первые работы Линде в области криогеники.

Характерно, что Ольшевский не патентовал свои многочисленные изобретения, используемые в изделиях фирмы; в то время на востоке Европы еще сохранилось убеждение, что истинному ученому не к лицу торговать своими идеями. (Вспомним, что А. С. Попов тоже не патентовал свои изобретения в области радио, в отличие от Маркони.)

Тем не менее фирма Гродзинского процветала. Обложка одного из ее каталогов показана на рис. 4.4. Фирма просуществовала до первой мировой войны. О ее популярности может свидетельствовать факт, о котором нельзя не упомянуть. Через много лет после описываемых событий, в мае 1932 г., американское посольство в Варшаве получило письмо одной фирмы (Г. Холуа). В нем было написано: "Перед войной в Кракове существовала фирма по производству красивых машин для сжижения таких газов, как воздух, водород и т.д. Я думаю, что она была в сотрудничестве с Краковским университетом..." Заканчивалось письмо просьбой установить точное название и адрес фирмы для установления деловых связей.

Работы Ольшевского, после отделения от Вроблевского, можно разделить на два этапа: до 1895 г. и после него. На первом этапе он использовал и совершенствовал уже проверенные методы, основанные на испарении сжиженных газов под вакуумом. Здесь он добился двух важных результатов.

Первый из них относится к попыткам сжижения водорода. Еще до смерти Вроблевского, в 1884 г., как он, так и Ольшевский, каждый независимо один от другого, сделали попытки сжечь водород, сочетая идею Кайете, основанную на расширении сжижаемого газа с отдачей внешней работы с интенсивным испарительным охлаждением. Аппаратура была сходна

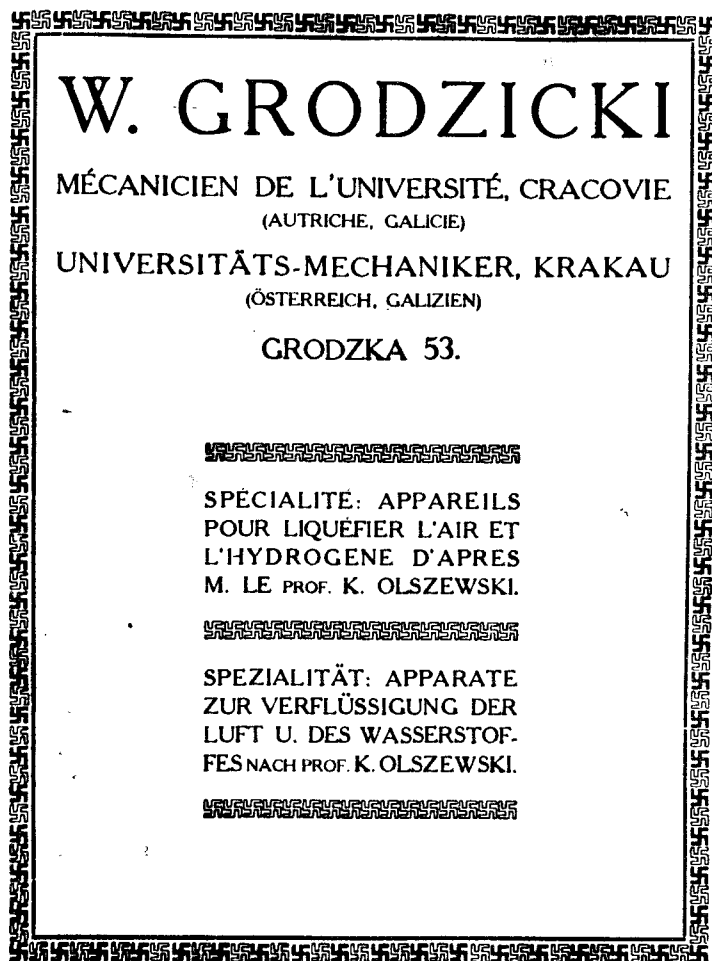


Рис. 4.4. Обложка каталога установок для ожижения воздуха и водорода фирмы В. Гродзинского со ссылкой на проф. К. Ольшевского

с той, которая была у Кайете. Разница состояла в том, что предварительное охлаждение делалось не испарением SO_2 , как у Кайете, а кипящим под вакуумом кислородом. Это дало возможность Ольшевскому понизить "стартовую" температуру до -198°C (75 K). У Вроблевского она составляла -182°C (91 K), так как он кислород испарял без вакуума. Начальное давление сжатого водорода было 10 МПа в опытах Вроблевско-

го и 19 МПа в опытах Ольшевского. Оба утверждали, что в конце расширения водорода наблюдали появление тумана, свидетельствующего об ожижении водорода.

Результат Ольшевского стал причиной довольно длительной дискуссии о приоритете в ожижении водорода между ним и англичанином Д. Дьюаром, который в 1898 г. (о нем речь впереди) получил водород в виде жидкости в сосуде.

В конце концов через много лет в дискуссии появилось промежуточное решение, удовлетворившее и польскую, и британскую стороны: Ольшевский первым получил жидкий водород в виде тумана (в "динамическом состоянии"), а Дьюар – первым в виде жидкости ("статическое состояние"). Повторилась та же ситуация, что и при ожижении кислорода: Пикте и Кайете получили жидкий кислород в виде тумана, а Вроблевский и Ольшевский – в виде жидкости.

Так или иначе, несомненно, что в этих опытах польские исследователи, аналогично Пикте и Кайете, сделали новый, хотя и кратковременный, но намного более глубокий рейд в область криотемператур, выйдя уже к уровню температур ниже 30 K. Для того времени это был рекордный результат.

Другим достижением, вернее двумя достижениями, Ольшевского в этот период было первое ожижение, а затем и замораживание вновь открытого газа – аргона. Его обнаружили в воздухе английские физики Дж. Рэлей и В. Рамзай в 1894 г.

Может показаться странным, что этот элемент, содержащийся в воздухе в солидном количестве (объемная доля составляет 0,912% или массовая доля – 1,28%), оставался так долго неизвестным. Дело в том, что, будучи химически инертным (отсюда и название – аргон по-гречески "ленивый"), он "прятался" за азотом, и только спектральный анализ помог его выявить¹. Началось активное изучение свойств нового вещества; в том числе нужно было и определить его критическую температуру, и попытаться перевести в жидкое состояние. Нужно было обратиться к специалисту в области низких температур, имеющему соответствующее оборудование. Таких людей было двое – коллега Рэрея и Рамзая по Лондонскому Королев-

¹ Правда, великий английский физик и химик Г. Кавендиш обнаружил его в 1781 г., удаляя азот из воздуха в результате окисления посредством электрических разрядов (подробнее об этом в гл. 5).

скому обществу Д. Дьюар (о котором речь впереди) и К. Ольшевский в далеком Кракове. В. Рамзай выбрал Ольшевского. Немалую роль сыграло и то обстоятельство, что Рамзай и Дьюар были в очень тяжелых отношениях. Д. Дьюар, хотя и мог тоже решить задачу, но имел совершенно несносный, тяжелый характер; помириться с ним было трудно. В. Рамзай решил с ним не связываться. Он послал в Краков письмо и драгоценную стеклянную ампулу с 300 см³ аргона. К. Ольшевский немедленно принялся за работу.

В статье о ее результатах он писал: "Я провел эксперименты по его (аргона - В. Б) свойствам при низких температурах и высоких давлениях, чтобы пополнить, хотя бы частично, знания об этом интересном веществе".

Прибор, который использовал Ольшевский, был относительно несложным. Аргон, подлежащий сжатию и охлаждению, подавался посредством столбика ртути из мерного сосуда в трубку, погруженную либо в жидкий этилен, либо в жидкий кислород (в зависимости от нужной температуры криостатирования)¹. Откачкой пара какой-либо из этих жидкостей устанавливалась нужная температура аргона.

На этом приборе Ольшевский не только получил жидкий аргон и определил температуры его кипения при разных давлениях, в том числе и критическую, но и заморозил его при $T = 84,5 \text{ K} (-189,6^\circ\text{C})$.

Это было крупным достижением. Впервые один из "постоянных" газов был переведен в твердое состояние. Судьба аргона в этом смысле была печальной. Другие "неподдающиеся" газы, давно известные, еще не покорились - до получения твердых кислорода, азота и оксида углерода еще было далеко. А аргон был покорен почти сразу после открытия!

Этим крупным достижением завершился первый период самостоятельной работы Ольшевского.

Второй период наступил после 1895 г., когда Линде и Хемпсон осуществили свои оживительные дроссельные установки, начав тем самым новое, перспективное направление в криогенике. К. Ольшевский быстро понял заложенные в нем возможности и создал на основе синтеза этих идей со своими

разработками целую серию новых, более эффективных лабораторных оживителей газов. Они были самыми лучшими из всех, тогда существовавших, и исправно служили науке в Вене, Берлине, Лейпциге, Праге, Мюнхене, Бонне и даже в Токио.

Работал Ольшевский и над оживлением водорода, чтобы получить его, как и кислород, в статическом состоянии. Он добился и этой цели, но слишком поздно; Д. Дьюар опередил его, впервые оживив водород в 1898 г. Через год после смерти Ольшевского в 1913 г. началась первая мировая война. Достоянного преемника, способного в этих трудных условиях продолжить традиции краковской научной школы, не нашлось; все ее работы были прекращены, а сохранившееся оборудование отправлено в музей.

4.2. ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗЫВАЕТ СВОИ ВОЗМОЖНОСТИ В КРИОГЕНИКЕ

Дальнейшее развитие криогеники связано с именем Карла Линде, того самого, который фигурировал в предыдущей главе как человек, не только создавший наиболее совершенные для своего времени паровые холодильные машины, но и впервые разработавший основы их теории, а также организовавший массовое их производство.

Всего этого с избытком хватило бы для того, чтобы занять почетное место в истории науки и техники низких температур. Однако Линде на этом не остановился. Вторую половину своей творческой жизни он посвятил криогенике, делавшей в 90-е годы первые шаги.

Расставшись в 1891 г. с заботами главы фирмы, он вернулся в Мюнхен. В своем жизнеописании Линде писал об этом так: "Мои мысли уже долгое время были заняты новыми открытиями в области более низких температур, которые необходимы для оживления "постоянных" газов. Обзор этих открытий я дал в докладе "Об оживлении газов", представленном Политехническому обществу".

Далее Линде четко сформулировал новую цель, которую мог поставить перед собой на основе этого аналитического обзора: "Еще отсутствовал прямой путь из лаборатории естественного испытателя к производству, и отыскание такого пути стало моей ближайшей задачей. Летом 1894 г. я нашел генеральную линию ее решения и взялся за дело".

¹ Криостатирование - поддержание на объекте некоторой постоянной криотемпературы.

Эта "генеральная линия", как мы увидим дальше, далеко не сводилась к перенесению имеющихся научных достижений в промышленное производство. К. Линде несомненно понимал, что это было бы не просто сложной задачей, а задачей невыполнимой. Имевшийся "научный задел", при всей его значительности, не годился для этого. Речь шла и о принципиально новых, именно научных, решениях, без которых путь к производству не был бы открыт. Линде понимал трудности, которые его ожидали. Он писал далее: "Меня одолевали размышления – найдет ли оставшаяся работоспособность – мне не было тогда еще 50 лет – здесь лучшее применение в связи с желанием вернуться к научной деятельности".

Так Карл Линде снова приступил к преподаванию в Мюнхенском политехническом институте и одновременно начал двигаться по намеченной "генеральной линии".

Как опытный инженер он понимал, что путь, по которому шли его предшественники от Фарадея до Ольшевского – однократное использование охлаждающей смеси и испарительного охлаждения, исчерпал себя. Нужно было переходить к непрерывному циклу – методу, уже проверенному в холодильных машинах. Но холодильный цикл не в состоянии дать очень низкие температуры, так как одно рабочее тело не может конденсироваться при температуре окружающей среды $T_{о.с.}$ и испаряться в той же машине при температуре ниже -50°C , в крайнем случае -60°C .

Так, например, аммиак, конденсирующийся при $T_{о.с.} = 20^{\circ}\text{C}$ (293 К) под давлением около 0,8 МПа, может дать в испарителе холодильной установки температуру 228 К (-45°C), если компрессор сможет откачать пар до тех пор, пока давление в испарителе не станет равным $6 \cdot 10^{-3}$ МПа. Далее двигаться нельзя не только потому, что давление будет слишком низким, но и потому, что аммиак замерзнет (температура тройной точки $T_{т.т.} = 195,4 \text{ К}$, т.е. около -18°C).

Поскольку никакой хладагент "в одиночку" не может в пароконденсационной холодильной установке перекрыть интервал температур от окружающей среды до жидкого воздуха и тем более водорода (он составляет 200°C и более), напрашивается мысль о каскаде – нескольких холодильных установках, объединенных в один агрегат. Тогда каждая из них отводила бы тепло на определенном уровне и передавала следующей, расположенной выше. Эта идея, впервые частично реализован-

ная Пикте в 1877 г., была хотя и рассмотрена сначала Линде, но затем отвергнута, поскольку он нашел более простое и надежное решение¹. Оно было основано на синтезе идеи В. Сименса о регенерации, относящейся к 1857 г., развитой в 1885 г. Сольвеем (которая описана в гл. 3) с комбинированным компрессионным циклом. В нижней, холодной его части использованы два элемента пароконденсационного цикла: холодопроизводящей – дроссель и испаритель, а в верхней, более теплой (вернее, менее холодной) – элементы газового цикла – генератор и компрессор с охладителем. Поэтому такой цикл, перекрывающий всю низкотемпературную область – от окружающей среды до жидкого воздуха (а впоследствии и до жидких водорода и гелия), называется газожидкостным. Такой "гибридный" процесс оказался на удивление здоровым и жизнеспособным и, мало того, занял на долгие годы ведущее положение в криогенике. В дальнейшем он с полным основанием был назван циклом Линде.

На рис. 4.5, а показана схематически установка Линде, на которой он впервые реализовал свою идею, а на рис. 4.5, б – схема в современных обозначениях.

Воздух поступает из атмосферы по трубопроводу и в поршневом компрессоре сжимается до высокого давления (~ 20 МПа). При этом он, естественно, нагревается. Чтобы охладить воздух до $T_{о.с.}$, используется водяной холодильник, в котором тепло сжатия отводится водой. Далее сжатый воздух поступает во внутреннюю трубку теплообменника, где охлаждается идущим навстречу (противотоком) холодным воздухом, оставшимся неожиженным. Охлажденный сжатый воздух дросселируется в вентиле 4, где расширяется. В результате дроссель-эффекта происходит снижение температуры потока воздуха и частичное его ожижение. Жидкий воздух собирается в сосуде 5, а пар отводится через кольцевое пространство между наружной и внутренней трубками теплообменника. Там он нагревается встречным потоком сжатого воздуха и снова поступает в компрессор, где к нему присоединяется воздух, всасываемый из атмосферы. Количество этого воздуха равно тому, которое отделяется в виде жидкости в сосуде 5 и отводится как

¹ В 1908 г. голландский физик Г. Камерлинг-Оннес, о котором речь впереди, использовал модернизированный каскад для первого ожижения гелия.

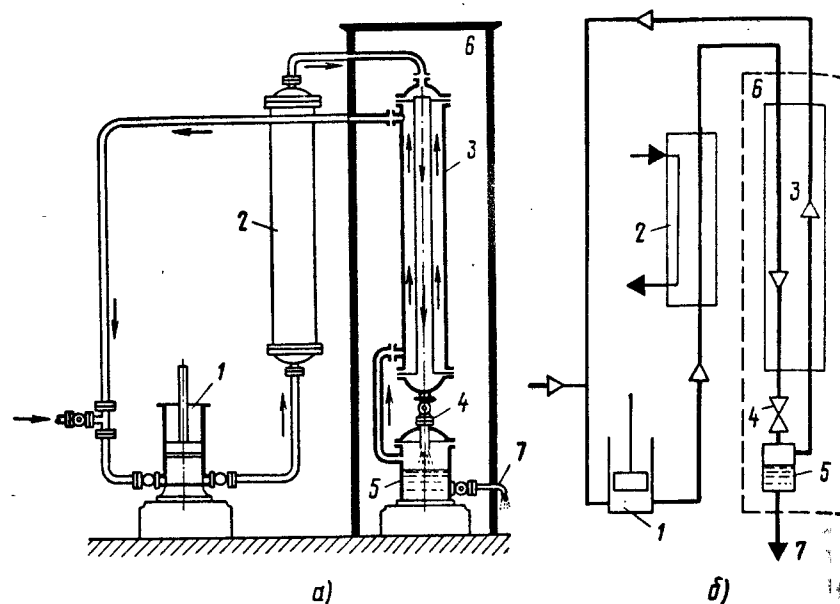


Рис. 4.5. Схема первой установки Линде для ожижения воздуха:

а — конструкция; б — схема; 1 — компрессор; 2 — водяной холодильник; 3 — теплообменник; 4 — дроссель; 5 — отделитель жидкости; 6 — кожух с тепловой изоляцией; 7 — слив жидкого воздуха

конечный продукт. Холодная часть аппарата была заключена в деревянный ящик 6, набитый тепловой изоляцией.

Проследим, как протекал процесс в установке Линде, начиная с момента ее запуска, используя схему на рис. 4.5. Первая порция сжатого воздуха поступала из компрессора в теплообменник при температуре окружающей среды T_{oc} и при тех же параметрах доходила до дроссельного вентиля. Здесь в результате дросселирования она охлаждалась примерно на $\Delta T = 50^\circ\text{C}$; следовательно, температура этой порции воздуха после расширения будет равна $20-50 = -30^\circ\text{C}$. Этот холодный воздух, пройдя через отделитель жидкости, возвращался в обратную линию менее холодным, так как охлаждал металл отделителя и трубопроводов. Примем для примера, что его температура стала -25°C . Двигаясь в теплообменнике навстречу новой порции поступающего сжатого воздуха, он охлаждает его, а сам нагревается. Этот процесс, естественно, не идеаль-

ный и выходящий воздух нагревается, скажем, до $+15^\circ\text{C}$, т.е. на $\Delta T_{расш} = 25 + 15 = 40^\circ\text{C}$. Прямой поток охладится за счет обратного, но не на 40°C , а меньше, по двум причинам. Во-первых, теплоемкость сжатого воздуха больше, чем расширенного; во-вторых, часть холода пойдет на охлаждение трубок. Примем значение этого охлаждения $\Delta T_{сж} = 25^\circ\text{C}$. Значит, следующая порция сжатого воздуха перед дросселем будет иметь температуру $20-25 = -5^\circ\text{C}$. После дросселирования она станет $-5+(-50) = -55^\circ\text{C}$, т.е. вторая порция обратного потока будет более холодной, чем первая (которая имела температуру -30°C). Соответственно, двигаясь противотоком новой порции воздуха, она снизит и его температуру перед дросселем примерно до -70°C . После дросселирования она станет уже -120°C и т.д.

Таким образом, температура перед дросселем будет постепенно понижаться до тех пор, пока после дросселирования не появится жидкий воздух. Тогда процесс постепенно начнет замедляться, так как обратный поток будет становиться меньше прямого (часть воздуха оживится и в обратный поток не пойдет). В конце концов наступит равновесие: 5-7% воздуха будет оживаться, а остальной воздух будет возвращаться через теплообменник. С этого момента установка будет постоянно производить жидкий воздух.

Эта первая установка Линде существенно отличалась от изящных лабораторных приборов Ольшевского не только принципом действия. Она была сделана как заводская машина, с немецкой основательностью и добротностью (только теплообменник весил 1300 кг!). При первом пуске установки в мае 1895 г. температура понижалась медленно и только на третьи сутки достигла уровня, при котором воздух начал оживаться и накапливаться в сборнике. Правда, на ночь установка отключалась и поэтому частично отогревалась в результате теплопритока извне, через изоляцию.

Однако это были детали, которые можно было доработать. Главное было сделано — впервые была создана установка ("ошеломляюще простая по сравнению с существующими", как написал Линде), позволяющая получать непрерывно жидкий воздух в количестве, равном десяткам литров. Сотрудники Линде носили жидкий воздух ведрами! Это был сенсационный успех. Летом 1895 г. Линде доложил о своей работе и ее результатах на правлении Союза немецких инженеров. Одновременно он совершенствовал свою установку, уменьшив массу теплообменного аппарата в 2 раза. Патентовать ее заранее он не

спешил, так как обнаружил, что во время ожигения происходит и частичное разделение воздуха, что представляло не меньший интерес, чем само ожигение. Он занялся патентованием позже и сделал это лишь 05.06.1895 г.

Английский патент Линде под названием "Процесс и аппаратура для ожигения газов и газовых смесей и получения холода, в частности, приложимые для извлечения кислорода из атмосферного воздуха" имел приоритет от 28 июня 1895 г.

В это время англичанин Вильям Хэмпсон работал в том же направлении, что и К. Линде. Он получил похожий английский патент с приоритетом от 23 мая того же 1895 г. под названием "Ожигение газов; усовершенствования". Установка, описанная в патенте Хэмпсона, имела два существенных отличия от установки Линде.

Первое, имеющее принципиальный характер, состояло в том, что у Хэмпсона не было четкого указания на процесс дросселирования, а лишь в общей форме упоминалось о расширении газа после охлаждения в теплообменнике. В этом приоритет явно принадлежал Линде, тем более что в мае 1895 г. его установка уже работала. Однако Хэмпсон довольно скоро тоже поставил на своем аппарате дроссель (не ссылаясь при этом на Линде).

Вопрос о том, в каком устройстве – детандере или дросселе производить окончательное охлаждение рабочего тела, имеет значение, далеко выходящее за пределы противоречий между Линде и Хэмпсоном.

Классический подход к созданию охлаждающих устройств, основанных на использовании понижения давления рабочего тела, как мы уже видели, базировался на расширении с отдачей внешней работы. На эту идею опирались все создатели воздушных холодильных машин, от Горри до Сименса и Сольвея, и это было вполне естественно. Еще до утверждения закона сохранения энергии было хорошо известно: если газ сжимать, затрачивая на это работу, он нагревается; если, напротив, заставить его расширяться, производя работу, он сильно охлаждается. Отсюда естественное стремление создать машину-детандер, в которой можно реализовать этот эффект и применить его к делу. Главная трудность при этом (и мы к этому вернемся дальше) состояла в том, чтобы заставить такую машину надежно работать при низких температурах: чем холоднее, тем труднее.

Другой способ охлаждения, тоже основанный на снижении давления рабочего тела, обратил на себя внимание значительно позже. Только после того, как Джоуль и Томсон открыли эффект изменения температуры газа при дросселировании, возникла мысль использовать его для охлаждения. Однако относительно малое значение эффекта Джоуля-Томсона и недостаточное понимание его физической природы долгое время не вызывали энтузиазма у инженеров. Более того, когда были изобретены парокompрессионные холодильные машины, их создатели не понимали истинной роли дроссельного вентиля. Они считали, что "холод получается в испарителе", где кипит под низким давлением рабочее тело, а дроссель служит просто для снижения давления и регулирования. Такое представление отразилось и в сохранившемся для него до настоящего времени названии "регулирующий вентиль".

Понимание того, что именно дросселирование дает охлаждение, понижение температуры, на котором основана работа системы, а в испарителе лишь реализуется его результат, пришло (да и то далеко не всюду) намного позже.

Значительное влияние на такой подход к дросселированию оказала и термодинамическая трактовка этого процесса, идущая из теплотехники. Действительно, в тепловых двигателях любая разность давлений, создаваемая в результате применения топлива, используется для получения работы в турбине, поршневом или каком-либо другом двигателе. "Стравливание" этого давления на любом гидравлическом сопротивлении – это прямая потеря работы, с которой нужно бороться всеми силами. В теплотехнике дроссель – "враг" или, в лучшем случае, – регулирующее устройство, с потерями давления в котором приходится мириться.

Однако при температуре ниже $T_{0,c}$ ситуация резко меняется – здесь главная цель уже не получение работы, а охлаждение. Чем ниже температура, тем меньше рабочее тело отдает при расширении работы и тем эффективнее работает на охлаждение. Поэтому потеря этой работы становится несущественной, а эффект охлаждения обеспечивает эффективное, с высоким КПД использование энергии, затрачиваемой на сжатие рабочего тела. Именно поэтому дроссельные парокompрессионные холодильные установки имеют КПД не ниже, а иногда и выше, чем современные паротурбинные электростанции.

К. Линде, в отличие от своих современников, понял эту диа-

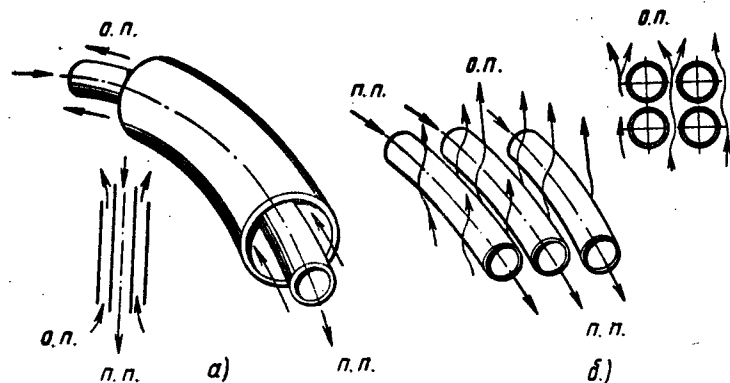


Рис. 4.6. Протекание потоков в теплообменниках Линде (а) и Хэмпсона (б):

п.п. — прямой поток (сжатый воздух); о.п. — обратный поток (расширенный воздух)

лектику отношений двух способов расширения — смело взяв дросселирование за основу своих работ и извлек из него почти все возможное ("почти" потому, что кое-что осталось и для будущего, но об этом — далее).

Второе отличие установки Хэмпсона от установки Линде было в конструкции регенеративного теплообменника. На разнице этих конструкций нужно остановиться подробнее, так как дальше она будет играть существенную роль. У Хэмпсона обратный поток неожиженного воздуха шел не вдоль трубок в кольцевом зазоре между ними, как у Линде (рис. 4.6, а), а поперек трубок в межтрубном пространстве (рис. 4.6, б).

Трубки, по которым шел сжатый охлаждаемый воздух, свивались с зазором между витками в плоские "блины", соединенные последовательно и укладываемые стопкой один на другой. Обратный поток неожиженного холодного воздуха проходил поперек трубок в радиальных зазорах между ними. Наружные трубки, которые применял Линде, уже не были нужны. Благодаря этому теплообменник становился много компактнее и легче; пуск установки мог проводиться быстрее. При этом справедливость требует сказать, что Хэмпсон решил задачу удачнее, чем Линде.

В конечном счете возникла ситуация с приоритетом, напоминающая ту, которая была у Кайете и Пикте. Однако разница состояла в том, что сроки подачи заявок на патенты различались (в пользу Хэмпсона на две недели), но фактически

реализация у Линде была сделана раньше (да и научный анализ процесса был несравненно более глубоким). Начался спор о приоритете, который однозначно так и не был решен. Он осложнился еще и соображениями национального престижа. До сих пор в Германии и странах континентальной Европы, включая Россию, в ходу термин "цикл Линде", а в Великобритании и США — "цикл Хэмпсона" или "цикл Хэмпсона-Линде". Что касается теплообменника Хэмпсона, то он в разных модификациях и с усовершенствованиями, внесенными позже, употребляется во многих криогенных установках до сих пор (в частности, и фирмой К. Линде).

В дальнейшем Хэмпсон развил очень бурную деятельность в отстаивании своих прав, вступив в длительную дискуссию не только с Линде, но и со своими соотечественниками Дьюаром и Ленноксом, а также с американцем Триплером. Во втором случае он претендовал и на приоритет в отношении идей, положенных в основу создания аппарата для ожижения водорода. Из-за всего этого в период 1896–1898 гг. в английской печати разгорелась дискуссия о приоритетах, главными действующими лицами которых были Хэмпсон и Дьюар. Она шла, главным образом, не в виде полемических научных статей, а как обмен письмами, публикуемыми в различных периодических изданиях, и ответами на них. Кроме того, шли довольно острые дискуссии в научных обществах, отчеты о которых также публиковались в печати. Все это оставляет довольно забавное впечатление.

Что касается К. Линде, то он ограничился публикацией в английском журнале большой статьи с изложением результатов своих работ по ожижению воздуха, упомянув в ней и о Кайете, и о работах Хэмпсона. После этого он ни в какие дискуссии не вступал и продолжал успешно совершенствовать разработанные им аппараты. Работа велась в двух направлениях.

Во-первых, нужно было улучшить установки для ожижения воздуха, уменьшая их массу и габариты, совершенствуя очистку воздуха от водяного пара и CO_2 , всегда содержащихся в атмосфере¹, и, наконец, снижая затраты энергии на ожижение.

¹ Это было нужно как для получения чистого, прозрачного продукта, так и для того, чтобы избежать забивки трубок теплообменника и арматуры "снегом" H_2O и CO_2 , который выделяется при охлаждении неоочищенного воздуха.

Во-вторых (и это стало главным направлением), нужно было реализовать в полной мере возникшую у него еще в 1895 г. идею разделять воздух при ожижении на составные части, получая из него кислород и азот. Для этого потребовались дополнительные исследования и целая серия изобретений, тут же успешно реализованных. Уже в 1902 г. была пущена первая кислородная станция. В дальнейшем на основе этих работ Линде и под их влиянием создание установок для низкотемпературного разделения воздуха (и других газовых смесей) развилось в мощную отрасль промышленности сначала в Германии, Франции и Англии, а со второй половины XX в. в СССР и Японии.

Наряду с заботами о фирме, которая теперь еще выросла и стала выпускать не только холодильные, но и криогенные установки, К. Линде продолжал и педагогическую деятельность в Мюнхенском политехническом институте (до 1910 г.). Здесь он, в частности, начал подготовку курса прикладной термодинамики как базового предмета для подготовки инженеров, специализирующихся в области техники низких температур. К. Линде был также одним из основателей знаменитого Мюнхенского музея техники, членом Совета которого он оставался долгие годы.

К. Линде прожил долгую жизнь (он умер в 1934 г.) и имел возможность видеть, как его идеи и разработки развились и вошли существенной составной частью в научную и техническую жизнь XX в.

Воздухоожижительные установки фирмы К. Линде довольно быстро стали распространяться и за пределами Германии. Первая криогенная лаборатория в России была организована при Московском университете в 1898 г. на базе закупленного у фирмы Линде оборудования. Оно включало электродвигатель мощностью 5 л.с. (3,7 кВт), двухступенчатый воздушный компрессор с водяной смазкой цилиндров, сжимающий воздух до 20 МПа, и криоблок для ожижения воздуха.

Все это вместе с доставкой обошлось в 2000 руб., которые пожертвовал купец Иван Абрамович Морозов, поддержавший таким образом инициативу известного физика профессора Московского университета Николая Алексеевича Умова (1846–1915 гг.).

Ожижитель воздуха был установлен в подвальном этаже физической лаборатории и через несколько месяцев в конце

августа 1898 г. состоялся его торжественный пуск. Как написал корреспондент газеты "Русские ведомости", "было получено около 6 л или полведра жидкого воздуха. Часть его была отвезена И. А. Морозову, другая же была в ближайшие дни использована на опыты в присутствии профессоров и лиц, принадлежавших к составу университета, а также в Александровском коммерческом училище".

В комплект установки входили 13 стеклянных сосудов Дьюара вместимостью от 0,15 л до 2 л. Поскольку очистка ожимаемого воздуха от влаги и углекислого газа не была предусмотрена, жидкий воздух содержал мелкие кристаллы этих примесей и по внешнему виду напоминал молоко. Поэтому демонстрация опытов начиналась с фильтрации жидкого воздуха через бумагу, после чего он становился прозрачным. Кроме этого, демонстрировались замораживание ртути и коньяка жидким воздухом, горение различных материалов в воздухе, обогащенном кислородом, свечение стеарина после погружения в жидкий воздух и т.п.

Несмотря, однако, на всеобщее удивление, восхищение и даже статьи проф. Умова, в которых описывались возможности низкотемпературной техники, дальше демонстрационных опытов дело не продвинулось. Организовать планомерную научную работу в области низких температур, о которой мечтал Умов, из-за отсутствия средств и равнодушия начальства не удалось.

В 1900 г. проф. Умов был вынужден отказаться от руководства физической лабораторией. Заведование той ее частью, в которой находилась криогенная установка, перешло к главе московской школы физиков П. Н. Лебедеву. Его круг интересов лежал в совершенно другой области науки.

Именно в это время он готовил свой знаменитый опыт по давлению света на твердые тела (1899 г.) и ему было не до низкотемпературных вопросов; средств едва хватало на собственные исследования. Вскоре установка Линде "подверглась порче и перестала действовать".

После того, как в знак протеста против реакционных действий царского министра просвещения Кассо Столетов и Лебедев ушли из Московского университета (1911 г.), дела в лаборатории пошли еще хуже. В 1912 г. П. Н. Лебедев умер. Воздухоожижительную установку сначала сняли с фундамента и поместили в музей, а затем в 1915 г. выбросили вовсе.

Так печально закончилась первая попытка организовать в России научные исследования в области криогенной науки и ее приложений. Они возобновились лишь после революции сначала в Харькове, а затем в Москве и быстро вывели нашу страну на передовые позиции в области физики (а затем и техники) низких температур. Об этих работах, связанных с именами П. Л. Капицы, А. В. Шубникова и Л. Д. Ландау, будет рассказано позже.

Все достижения теории и практики 1895–1896 гг., связанные с циклом Линде и его модификациями, не могли снять еще нерешенной задачи ожижения водорода. Последний еще уцелевший член старой команды "постоянных" газов продолжал упорно сопротивляться всем попыткам перевести его в жидкость. Было уже ясно, что для этого нужно превзойти прежние рекорды и оторваться от зоны температур твердых кислорода и азота, а они (соответственно 54 и 63 К) уже были достигнуты Дьюаром классическим методом откачки пара над жидкостью. Другими словами, это означало, что необходимо пройти интервал от 60 до 20 К – задача вдвойне трудная. Во-первых, потому, что, как мы видели, каждый градус здесь в несколько раз "дороже", чем в зоне температур жидких кислорода и азота. Во-вторых, было неясно, как предохранить полученный жидкий водород (и всю низкотемпературную часть установки) от теплопритоков извне. Теплота испарения ожиженных газов намного меньше, чем у воды (у кислорода в 10,6 раза, у азота в 11,3 раза). У водорода, если такая тенденция сохранится, как правильно полагали, она будет еще ниже.

Обе эти задачи были решены английским физиком Джеймсом Дьюаром, который преодолел все эти трудности и добился успеха в 1898 г. Это был тот самый человек, с которым Хэмпсон боролся за приоритет. Разумеется, достижение Дьюара не было случайностью. Только в 1898 г. создались необходимые для ожижения водорода условия. Во-первых, был изобретен и реализован дроссельный газожидкостный цикл, возможности которого, несмотря на достижения Линде и Хэмпсона, еще далеко не были исчерпаны. Во-вторых, с помощью работ француза Д'Арсонваля, немца Вайнхольда и самого Дьюара была создана новая вакуумная теплоизоляция, позволяющая снизить теплопритоки извне к холодной части ожижительной установки и самому ожиженному газу во много раз.

Рис. 4.7. Джеймс Дьюар

Разумеется, наличие этих условий ни в коей мере не умаляет заслуг Дьюара. Превратить возможность в действительность иногда даже труднее, чем создать эту возможность.

Джеймс Дьюар (1842–1923 гг.) был едва ли не самой оригинальной личностью среди вошедших в историю выдающихся деятелей низкотемпературной физики и техники. Более того, он занимает заметное место даже среди тех выдающихся деятелей науки Англии и Шотландии, которые вошли в исто-

рию не только в связи с выдающимися научными заслугами, но и оригинальностью своего характера (взять хотя бы для примера Кавендиша, Хэвисайда, да и самого И. Ньютона).

Д. Дьюар родился в семье шотландца – виноторговца и владельца небольшой гостиницы в городке Кинкардине; он был младшим из его семи сыновей. Мальчик рос в довольно свободной атмосфере, учился в местной школе, увлекался игрой на флейте. В десятилетнем возрасте с ним произошел несчастный случай – играя зимой на реке, он провалился под лед; его спасли, но в результате сильной простуды здоровье его было подорвано. Несколько лет он принужден был пользоваться костылями из-за ревматизма, а болезнь легких заставила расстаться с игрой на флейте. Однако Джеймс не бросил музыку: он овладел игрой на скрипке. Более того, деревенский столяр, живший поблизости и занимавшийся изготовлением скрипок, приучил его к своему ремеслу, а точнее – искусству. Мальчик научился делать скрипки и овладел этим мастерством на вполне профессиональном уровне. Скрипка, которую он смастерил в двенадцатилетнем возрасте, сопровождала его всю жизнь; на ней играли на праздновании его золотой свадьбы.



Именно благодаря скрипичному мастеру было, по-видимому, положено начало тому "рукодельному" мастерству, которое так помогало впоследствии Дьюару в его тонких экспериментальных работах.

Джеймс, несмотря на болезнь, учился в школе хорошо и даже получил медаль и первую премию по математике. Закончив школу (к этому времени он уже оправился от болезни), он поступил в Эдинбургский университет и после успешного его окончания (получил четыре различных премии) был оставлен (1861 г.) при нем как лектор по химии.

Педагогическая работа, однако, "не пошла" у Дьюара ни в Эдинбурге, ни в Кембриджском университете, куда он был приглашен на должность профессора экспериментальной физики. Тридцатичетырехлетний профессор явно не подходил для воспитания юношества. Он был нетерпелив, вспыльчив и "не терпел дураков". Как написал с истинно британской сдержанностью проф. Е. Мендельсон, посвятивший ему целую главу в книге "Дорога к абсолютному нулю", "Дьюар и Кембридж, по-видимому, не смогли понять друг друга".

Наконец через два года Дьюар принял предложение занять кафедру химии в Лондонском Королевском институте, ту самую, где когда-то работал Фарадей. Здесь он оказался в обстановке, наилучшим образом соответствующей его характеру; он мог спокойно работать без необходимости общения со многими людьми и сам выбирать направление исследований. Конечно, он не мог полностью продолжить традиции Фарадея, который один умел охватить несколько направлений, но одно из них – ожижение газов, он развил вполне достойно. Однако на низкие температуры он вышел не сразу. Сначала он работал в области химии. Промежуточной ступенью на пути к низким температурам стали исследования теплоемкости твердых тел. Д. Дьюар установил ее уменьшение при понижении температуры. Он не был особенно склонен к высокой теории, но обладал блестящим чутьем на новое и уникальным даром экспериментатора, который мог не только придумать идею прибора, но и осуществить ее своими руками. Кроме того, он умел наилучшим образом, артистически продемонстрировать полученные результаты. Именно в области криогеники эти его способности проявились в наибольшей степени.

В Королевском институте Дьюар проработал до самой смер-

ти (умер в возрасте 81 года). Еще за три дня до этого он работал до поздней ночи в лаборатории, а утром почувствовал себя плохо и был доставлен в больницу, где и скончался. Последней его работой было экспериментальное доказательство идентичности α -частиц атомам гелия.

Начало исследований Дьюара в низкотемпературной области относится к концу 70-х годов, когда он приступил к работам с аппаратами Кайете, выписанными из Парижа (все дороги криогеники вели в то время в Париж). Пытаясь превзойти Вроблевского и Ольшевского, он повторил и их опыты. На основе той же методики, что и они, он добился первого достижения – получил впервые твердый кислород (1886 г.). Этот рекорд соответствовал температуре 53 К. Казалось бы, дальше начиналась прямая дорога к ожижению водорода. Но Дьюар сперва выбрал неверный, традиционный путь – вакуумирование и внешнее охлаждение, который здесь уже оказался тупиковым. В качестве нового охлаждающего вещества для водорода он решил применить раствор водорода в азоте, который, по его мнению, останется жидким при температурах ниже 50 К. Тогда, как он рассчитывал, можно будет в результате вакуумирования этого раствора охладить водород ниже его критической температуры и оживить под соответствующим давлением.

К сожалению, этого не получилось – водород не желал в заметном количестве растворяться в азоте; поэтому азот исправно замерзал при $T = 63$ К и никакой новой низкотемпературной жидкости не получилось¹.

Однако Дьюар в это время сделал другую работу, подготовившую условия для ожижения водорода, о необходимости которой уже упоминалось выше: он разработал сосуды для хранения ожиженных газов с высококачественной изоляцией, названные в дальнейшем сосуда́ми Дьюара.

¹ И впоследствии не удалось найти никакого вещества или раствора, который бы оставался жидким при температурах ниже 50 К вплоть до критической температуры водорода (33,2 К). В этом интервале никакая жидкость "не живет". Здесь может существовать либо газ (водород или гелий), либо твердое тело (замороженные кислород, азот, аргон и другие газы). Такая же ситуация существует и ниже тройной точки водорода (13,8 К) вплоть до критической температуры гелия (5,2 К). Здесь тоже никакая из известных стабильных жидкостей существовать не может.

Мысль о том, что для тепловой изоляции сосудов, в которых должны храниться низкотемпературные вещества или препараты, их надо делать двустенными, была высказана и реализована еще задолго до Дьюара французом Д'Арсонвалем. Затем Вроблевский и Ольшевский поместили между стенками хлористый кальций, который поглощал водяной пар в межстенном пространстве. Тогда внутренний сосуд уже не покрывался инеем и можно было наблюдать, как ведет себя находящийся в нем ожиженный газ. Наконец, Вайнхольд (и независимо от него Д'Арсонваль в 1887 г.) предложил откачивать воздух из пространства между сосудами. Это сделало изоляцию еще более совершенной, так как поступление тепла извне путем теплопроводности воздуха практически исключалось; оставались только излучение и теплопроводность стеклянных стенок внутреннего сосуда.

Д. Дьюар первым реализовал идею вакуумного сосуда на практике, преодолев многочисленные технологические трудности (выбор состава стекла, выдерживающего большие перепады температур, получение глубокого вакуума, новые стеклoduвные задачи). Однако все это, естественно, не оправдывает того обстоятельства, что о заслугах своих предшественников в этой части он не упомянул.

Однако впоследствии Дьюар внес существенный вклад в дальнейшее совершенствование вакуумных сосудов. Он предложил и реализовал две интересные идеи. Первая из них – предложение посеребрить изнутри стенки сосудов, уменьшив таким образом теплоприток с излучением, поскольку зеркальная поверхность его отражала. Для наблюдения за содержимым на сосуде оставлялась вертикальная, не посеребренная прозрачная полоса. Вторая идея Дьюара (1904 г.) состояла в том, чтобы в вакуумную полость поместить некоторое количество адсорбента (активированного угля), который поглощал бы при низкой температуре те небольшие количества воздуха, которые с течением времени могли выделиться из стенок сосуда или проникнуть через них. Всасывающее действие адсорбента было тем лучше, чем ниже была температура содержимого в сосуде.

В конечном счете, несмотря на то что вакуумный сосуд как таковой был изобретен не Дьюаром, присвоение его имени этому устройству (в его окончательном виде) вполне обосновано. Стеклянные сосуды Дьюара можно и теперь встретить в любой лаборатории, связанной с криогеникой.

Именно эти сосуды дали возможность Дьюару проводить свои знаменитые лекции, на которых он демонстрировал эффектные опыты с ожиженными газами. Дьюар, несомненно, обладал незаурядными данными не только актера, но и режиссера; его "криоспектакли", как их можно было бы назвать, вызвали широкий резонанс среди ученой (и тем более неученой, в том числе и светской) публики. Каждый именитый член Королевского общества считал своим долгом побывать на этих лекциях; неизменно их посещала и леди Дьюар. Лектор искусно находил такие повороты темы и формы опытов, которые производили наибольшее впечатление на аудиторию.

Именно Дьюар разработал такие "номера", как замораживание в жидком кислороде или азоте растений и насекомых, резиновых трубок с последующим их раскалыванием, извлечение мелодичного звона из глухого при обычных температурах свинцового колокольчика после его замораживания, ковка твердой ртути, свечение замороженного сахара и т.п., которые вошли потом в постоянный репертуар всех подобных демонстраций.

Эти научно-художественные лекции не только способствовали повышению интереса к новой области науки и росту популярности самого Д. Дьюара, но и приносили более ощутимые плоды. Дьюар всегда в нужный момент умел подчеркнуть, что экспериментальная наука требует больших расходов. Даже объединение ювелиров Лондона поняло это и внесло 1000 фунтов стерлингов для продолжения его работ.

Итак, стараниями Дьюара была подготовлена идеальная "тара", в которую можно было наливать жидкий водород и изучать его свойства. Осталось только его получить. Но как? Старые способы не годились, а новых путей не было видно. Но в 1895 г. появились работа Линде и теплообменник Хэмпсона. Д. Дьюар понял, что путь к жидкому водороду можно проложить, используя заложенные в них идеи. Он немедленно приступил к работе. О том, каким был в деталях его ожижитель водорода, судить трудно, так как Дьюар не опубликовал ни до, ни после своего успеха подробного описания – только схему. Однако известно, что предварительное охлаждение водорода велось до уровня 68 K (-205°C); этого вполне достаточно, чтобы установить принцип действия этой схемы.

Напомним, что эффект Джоуля–Томсона при дросселировании может быть как положительным (охлаждение), так и

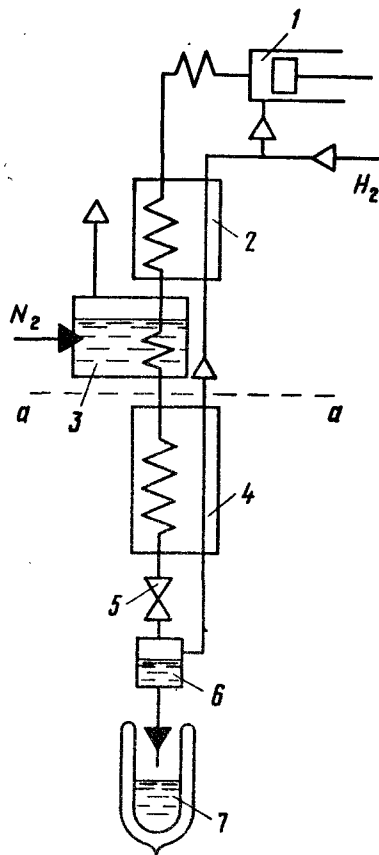


Рис. 4.8. Схема сжижения водорода, разработанная Дьюаром:

1 — компрессор; 2 — предварительный теплообменник; 3 — ванна с жидким азотом; 4 — основной теплообменник; 5 — дроссель; 6 — отделитель жидкости; 7 — сосуд Дьюара с жидким водородом

отрицательным (нагревание). Все зависит от того, выше или ниже инверсионной температуры находится дросселируемый газ или пар. Как в парокомпрессионных установках, так и в охладителе Линде рабочее тело имеет температуру намного ниже инверсионной (например, для воздуха температура инверсии для тех давлений, которые используются в установке Линде, $T_{инв} = 650$ К, т.е. лежит намного выше области, где установка работает. Водород, напротив, имеет очень низкую тем-

пературу инверсии $T_{инв} = 264$ К). Поэтому его дросселирование при $T_{о.с.}$ не только не приведет к охлаждению, но наоборот, водород нагреется. Однако если предварительно чем-нибудь извне охладить водород ниже $T_{инв}$, то он исправно будет охлаждаться при дросселировании, так же как и воздух. Следовательно, при этих температурах можно успешно применить схему, использованную Линде для сжижения воздуха. Дьюар так и сделал, используя для предварительного охлаждения H_2 жидкий азот под вакуумом. Соответствующая схема показана на рис. 4.8.

Видно, что ниже линии aa' , показывающей температуру предварительного охлаждения, процесс совершенно аналогичен тому, который использовался Линде для получения жидкого воздуха. Верхний теплообменник служит для предварительного

охлаждения сжатого водорода идущим противотоком расширенным неожиженным водородом. Установка Дьюара была окончательно отлажена, пущена и начала сжижать водород 10 мая 1898 г. За 5 мин его накопилось около 20 см^3 . После этого ее пришлось остановить, так как трубки теплообменника закупорились вымерзающими примесями водорода. Эта неприятность (с которой в свое время столкнулся и Линде применительно к примесям воздуха) была временной и не изменила результата: жидкий водород наконец получен!

Даже очередное заявление Хэмпсона, помещенное в журнале "Nature", о том, что Дьюар не отмечает его заслуги, не смогло омрачить торжества. "Дьюар, — утверждал он, — скрывает важное обстоятельство: еще в 1894 г. Хэмпсон во время визита в Королевский институт рассказал Ленноксу, ассистенту Дьюара, о своих идеях, которые тот и использовал". В ответном письме Дьюар ехидно написал, что он не только ничего не знал ни о каких идеях Хэмпсона, но даже если бы его вообще не было на свете, то результат был бы тем же. Последующая перепалка между ними представляет интерес уже не столько научно-исторический, сколько психологический. Хэмпсон в конце концов успокоился по части приоритетов и переключился полностью на совершенствование и производство небольших охладителей воздуха. Кроме этого, он с удовольствием консультировал тех, кто занимался низкотемпературной техникой независимо от Дьюара.

Годом позже, в 1899 г., Дьюар получил и твердый водород путем вакуумной откачки жидкого. Ему пришлось преодолеть много трудностей, в том числе и связанных с температурными измерениями в водородной области. В конце концов была установлена достаточно точно температура как жидкого (при $0,1 \text{ МПа}$), так и твердого (при $7 \cdot 10^3 \text{ МПа}$) водорода — соответственно 20 и 13,8 К. Последняя цифра интересна тем, что это был рекорд XIX в. на пути к абсолютному нулю.

4.3. ПОСЛЕДНИЙ "НЕПОДАДАЮЩИЙСЯ" ГАЗ НАКОНЕЦ ОЖИЖЕН

Наступал XX в., а с ним перед криогеникой вставали и новые, более трудные задачи.

Одной из них было сжижение единственного оставшегося непокоренным нового газа — гелия, занявшего место последнего "постоянного" газа — водорода. Гелий был открыт посред-

ством спектрального анализа сначала на Солнце (Жансоном, Локьером и Фрэнклендом, 1869 г.) и отсюда получил свое название. Те, кто занимался низкими температурами, не придавали особого значения этому открытию: мало ли какие еще элементы есть на Солнце! Но в 1895 г. У. Рамзай при поисках аргона в минерале ураните обнаружил гелий и на Земле. Было также установлено, что он содержится и в воздухе, правда, в очень малой концентрации ($5,24 \cdot 10^{-4}\%$). У. Рамзаю удалось все же собрать некоторое количество гелия, достаточное для изучения его свойств¹. Оказалось, что наряду с прочими уникальными особенностями гелий "не желал" оживаться даже при температурах твердого водорода! Таким образом, в распоряжении физиков и инженеров оказалось уникальное вещество, которое, во-первых, во всем доступном интервале температур оставалось в газообразном состоянии и, во-вторых, если его удалось бы оживить, был бы самой холодной жидкостью из всех возможных.

Оживление гелия стало задачей № 1 для всех исследователей, связанных с криотемпературами. За ее решение активно взялись Ольшевский, Рамзай с Трэверсом и, конечно, Дьюар. Но ни одному из них добиться успеха не удалось.

Неудачи Дьюара и всех других исследователей не были случайностью. Оживление гелия требовало принципиально нового подхода к задаче, уже в духе XX в. "Лабораторный" период криогеники исчерпал здесь свои возможности. Нужны были установки и оборудование промышленного или полупромышленного масштаба. Общая для большинства научных исследований XX в. тенденция проявилась и здесь. Первую крупную исследовательскую лабораторию такого типа, размером с небольшой завод, создал в 80-х годах при Лейденском университете голландский физик Камерлинг-Оннес. Он сумел синтезировать лучшие традиции "лабораторной криогеники" своих предшественников с инженерным подходом К. Линде, который

¹ Для этого ему понадобился оживитель водорода. Поскольку сотрудничество с Дьюаром из-за сложностей его характера исключалось, Рамзай привлек для создания оживителя молодого сотрудника М. Трэверса, который построил за два года при консультации Хэмпсона (здесь он взял реванш) простой и надежный оживитель водорода. Используя его, Рамзай смог извлечь из воздуха и очистить нужное ему количество гелия.

первым продвинул криогенику в технику. В сочетании с основательной теоретической физикой получился тот базис, опираясь на который Камерлинг-Оннес не только оживил гелий, но и заложил основу тех традиций, которым следует до сих пор криогеника XX в.

Прежде чем перейти к описанию достижений Камерлинг-Оннеса, необходимо вспомнить, что нидерландская научная школа имеет давние и славные традиции. При этом можно упомянуть такие имена, как Х. Гюйгенс, Д. Левенгук, Я. Вант-Гофф, Ван-дер-Ваальс – учитель Камерлинг-Оннеса. Нелишне и вспомнить, что первое оживление газа было выполнено М. Ван-Марумом в Гааге.

Гейке Камерлинг-Оннес (1853–1926 гг.) родился в Гронингене в Голландии, где учился в школе и затем с 1870 г. в университете. В 1871–1873 гг. учился в Гейдельберге у Бунзена и Кирхгофа. С 1882 г. Камерлинг-Оннес стал профессором Лейденского университета и возглавил группу молодых физиков, занимавшихся изучением свойств реальных газов на основе работ Ван-дер-Ваальса.

С самого начала своей научной работы и до конца жизни Камерлинг-Оннес руководствовался любимым лозунгом: "Через измерения к знаниям". Этот девиз он не забывал и тогда, когда начал создавать при Лейденском университете свою криогенную лабораторию. Впоследствии она стала классической моделью для всех научно-исследовательских организаций XX в., связанных с экспериментальными исследованиями.

Для того чтобы сделать это, нужно было сочетать в себе несколько качеств, которые (особенно в таких масштабах) встречаются в одном человеке чрезвычайно редко. Первое из них – организационные способности (в широком смысле этого слова). Тут и умение наладить отношения с людьми как "по вертикали" – "наверху" и "внизу", так и "по горизонтали" – со своими коллегами. Тут и умение найти себе сотрудников с нужными способностями. Сюда же относится и устойчивость по отношению ко всяким трудностям и неприятностям, которая определяется не только глубокими знаниями, но и умением прогнозировать и с опережением решать, куда нужно направить усилия свои и коллектива и какими методами осуществить намеченное. Г. Камерлинг-Оннес был именно таким универсальным организатором и исследователем. Все эти качества становятся особенно рельефными при сравнении его



Рис. 4.9. Гейке Камерлинг-Оннес

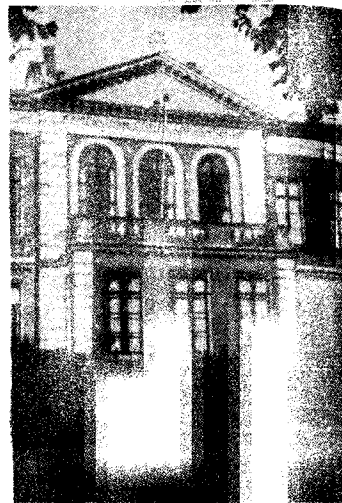


Рис. 4.10. Центральная часть здания криогенной лаборатории Камерлинг-Оннеса

с предшественниками и современниками, работавшими в той же области.

В отличие от Дьюара, работавшего с одним или двумя помощниками и скрывавшего от них свои мысли, Камерлинг-Оннес обладал умением собирать вокруг себя способных людей, заражать их своими идеями и сплачивать коллектив специалистов, дополняющих друг друга. Особое внимание он уделял вспомогательному персоналу, в особенности приборщикам, стеклодувам и медникам. Он даже организовал при своей лаборатории школу для повышения их квалификации.

Во многих чертах он был сходен с К. Линде, который тоже умел поставить дело широко, с привлечением многих людей и связать науку через технику с промышленностью. Разница между ними состоит в том, что Линде поставил науку на службу промышленности, а Камерлинг-Оннес — промышленности на службу науке. Таким образом, они двигались с разных сторон, но, в конечном итоге, к одной цели, характерной для XX в., — развитию науки и превращению ее в производительную силу общества. Именно этим, в конечном счете, объясняются успехи и того и другого. Важно отметить еще две черты Камерлинг-Оннеса. Прежде всего — это открытость и гостеприимство. И дома, и в лаборатории у него всегда было много гостей

стажеров. Мария Кюри, работавшая некоторое время у него, писала, что эти дни были одними из самых счастливых в ее жизни. Другая его важная черта — щепетильность в оценке вклада в дело своих сотрудников и помощников. Во всех публикациях он неизменно рядом со своей фамилией ставил фамилию того сотрудника (или сотрудников), с которыми эта работа производилась.

Не нужно, разумеется, думать, что путь Камерлинг-Оннеса при создании и расширении лаборатории был гладким и усыпанным розами. Оборудование и строительство требовали больших затрат и нужно было добывать средства; пожертвования ювелиров вроде тех, которые поддерживали Дьюара, или купца, поддержавшего Умова, здесь были бы недостаточны. Трудности были не только финансовые. Появлялись и враги. Один из них написал донос в Министерство внутренних дел о том, что работу лаборатории нужно остановить, так как проф. Камерлинг-Оннес употребляет баллоны со сжатыми до высокого давления газами. Если они взорвутся, то разнесут не только лабораторию и работавших в ней людей, но и все вокруг. Поэтому надо все это запретить. Министерство так и сделало, назначив комиссию, которая должна была решить — что делать дальше. Дело закрутилось, и лаборатория была вынуждена прекратить эксперименты. К счастью, комиссия оказалась достаточно объективной и квалифицированной. В ее состав входил и великий физик Ван-дер-Ваальс, который простым расчетом доказал вздорность всех обвинений. Кроме того, на запросы Камерлинг-Оннеса отозвались ведущие иностранные физики, поддержавшие его, в том числе К. Ольшевский и Л. Дьюар. В конце концов было признано, что техника безопасности¹ соблюдается, и все работы были разрешены, но почти два года были потеряны.

Г. Камерлинг-Оннес вел осаду гелия методично и основательно. Он получил жидкий водород позже Дьюара (1906 г.), но не в лабораторной установке, дающей несколько граммов, а в полупромышленной, дающей до 4 л/ч. Другими словами, для наступления на гелий уже можно было располагать запасом жидкого водорода в десятки литров — количество для то-

¹Техника безопасности, по определению одного специалиста, — это "знание того, что надо делать, чтобы не делать того, чего не надо делать". В низкотемпературной технике это очень важно.

го времени небывалое! Еще большие возможности были связаны с получением жидкого воздуха.

Интересны приведенные ниже цифры, показывающие, какое количество охлажденных газов использовалось в Лейденской криогенной лаборатории¹:

Годы	1903	1904	1905	1906	1907
Жидкий воздух, л ...	66	422	480	1119	1462
Жидкий водород, л ...	—	—	—	71	167

Эти цифры для того времени были совершенно фантастическими и не шли ни в какое сравнение с теми, которые были в других лабораториях.

Г. Камерлинг-Оннес постепенно завоевывал и закреплял позиции, все ближе подступая к оживлению гелия.

Был разработан наконец и проект гелиевого оживителя. Он должен был представлять собой большую комплексную систему каскадного типа, основанную на последовательном включении ступеней, каждая из которых была задумана как цикл Линде на соответствующем рабочем теле, так как это было сделано в более простом варианте Льюаром для водорода (см. рис. 4.8). В установке было шесть ступеней — хлорметиловая, этиленовая, кислородная, азотная, водородная и, наконец, гелиевая. Гелий после охлаждения водородом и регенеративного теплообменника должен был дросселироваться и оживаться, накапливаясь в стеклянном сосуде Льюара. Неоживившаяся часть гелия возвращалась противотоком в регенеративный теплообменник, охлаждая гелий, идущий к дросселю. Пока в мастерских под руководством помощников Камерлинг-Оннеса изготавливался оживитель, были приняты меры для получения чистого гелия в нужном количестве. В то время это был экзотический продукт, добываемый из монацитового песка. В этом помог брат Камерлинга-Оннеса, возглавлявший "Контору промышленной информации" в Амстердаме, которая знала почти все о том, где что делается и как это приобрести.

Наконец, нужно было организовать еще два дела: во-первых, провести эксперименты, позволяющие рассчитать критическую температуру гелия (она оказалась около 5 К, как и предсказывал Льюар), и, во-вторых, обеспечить надежную очистку

¹ Слово "криогенный" ввел в употребление тоже Камерлинг-Оннес.

водорода и гелия, чтобы избежать забивки трубок теплообменника вымерзающими примесями.

Все было предусмотрено, оживительная установка готова и испытана. "Боеприпасы" — 75 л жидкого воздуха, затем 20 л жидкого водорода были приготовлены. Было проведено предварительное охлаждение установки, и в 16 ч 20 мин 10 июля 1908 г. в нее был запущен гелий. Долгое время никаких признаков появления жидкого гелия не было видно, и все собравшиеся вокруг установки почти потеряли надежду на успех. Однако, когда догадались снизу осветить сосуд Льюара, служивший отделителем, стало видно, что он почти доверху заполнен жидкостью. Это и был жидкий гелий! Историческое событие произошло в 18 ч 30 мин. Было получено 60 см³ жидкого гелия.

Г. Камерлинг-Оннес тут же сделал попытку добиться и затвердевания гелия классическим путем — откачкой. Были пущены в ход вакуумные насосы, посредством которых давление пара над гелием было снижено до 0,001 МПа. Однако цель достигнута не была — никаких признаков затвердевания гелий не показал. В 22 ч установка была выключена, и исторический эксперимент, потребовавший от всех, кто его готовил и проводил, как писал его руководитель, "максимально возможного длительного нахождения в предельно напряженном состоянии", успешно закончился.

Историческим этот эксперимент стал не только (и не столько) потому, что был оживлен последний "самый холодный" газ и достигнута рекордно низкая температура (как было установлено позже, около 1 К). Главное (что выяснилось уже в дальнейшем) состояло в том, что открывшаяся в результате работ Камерлинг-Оннеса область температур вела к открытию совершенно новых и непредвиденных явлений, которые нельзя было объяснить с помощью физики того времени. Одно за другим посыпались всякие "чудеса". Гелий не переходит в твердое состояние ни при каком понижении температуры, но теряет вязкость и становится "сверхтекучим". Еще позже были открыты связанные со сверхтекучестью и совсем, казалось бы, невероятные вещи, такие, как непрерывное вытекание жидкого гелия из сосуда, в который ничего не втекает, перетекание его через перегородку из части сосуда, где его уровень ниже, в другую, где его уровень выше, и еще многое, не менее необъяснимое. Все это сделали его ученики и последователи как в Голландии, так и во многих других странах.

Начало исследованию необычайных свойств жидкого гелия положил еще сам Камерлинг-Оннес. Но самое главное, сделанное в 1911 г. его открытие, путь к которому проложило охлаждение гелия, – *сверхпроводимость*. Он обнаружил, что некоторые металлы при понижении температуры полностью "скачком" теряют электрическое сопротивление и становятся, как называли их Камерлинг-Оннес, "сверхпроводниками". Сверхпроводимость, так же как и необычные свойства жидкого гелия, "задала работу" целой плеяде физиков-теоретиков и экспериментаторов, а затем и инженерам. Он понимал, что теоретический анализ новой области, дверь в которую он открыл, займет много времени и потребует совсем новых идей. Результаты этой работы вошли важной составной частью как в новую физику, так и в технику и технологию XX в.

В последние годы жизни Камерлинг-Оннес продолжал научные исследования в области низких температур (в 1913 г. открытие сверхпроводимости было отмечено Нобелевской премией по физике). В эти же годы он много сделал для международного научного сотрудничества. Он был одним из организаторов Международного института холода, деятельность которого успешно продолжается до сих пор. До самой смерти (1923 г.) он продолжал оставаться старейшиной криогенистов всего мира.

Подробное описание и анализ физических явлений, связанных с ультранизкими температурами, не входит в нашу задачу¹. Далее мы все же вернемся к некоторым явлениям, происходящим при этих температурах, но будем рассматривать их не столько с точки зрения физики, сколько в связи с их инженерным использованием.

Оглянемся в заключение на драматическую историю многих летних усилий исследователей разных стран, занимавшихся теорией и экспериментами, связанными с охлаждением газов. Для того чтобы охватить картину в целом, полезно представить события, ее составляющие, так, как делают некоторые историки – в виде хронологической таблицы.

Из табл. 4.1 видно, сколько усилий многочисленных исследователей разных стран понадобилось для того, чтобы за срав-

Таблица 4.1. История охлаждения газов

Год	Событие	Действующие лица
1780	Охлаждение диоксида серы	Л. Клуз, Г. Монж
1787	Охлаждение аммиака	М. Ван-Марум
1788	Предсказание о возможности охлаждения и замораживания всех газов	А. Лавуазье
1823	Охлаждение хлора, сероводорода, диоксида азота, циана	М. Фарадей
1834	Получение твердого диоксида углерода	К. Тилорье
1845	Охлаждение бромистого водорода, иодистого водорода, сероводорода, фосфористого водорода, мышьяковистого водорода, циана, фтористого кремния	М. Фарадей
1845	Замораживание бромистого водорода, иодистого водорода, сероводорода, диоксида серы, аммиака, диоксида азота, циана	"
1861	Введение понятия о температуре "абсолютного кипения"	Д. И. Менделеев
1862	Введение понятия о критической температуре	Т. Эндрюс
1869	Открытие дроссель-эффекта	В. Томсон, Д. Джоуль
1877	Охлаждение кислорода: динамическое статическое	Л. Кайете, Р. Пикте, З. Вроблевский, К. Ольшевский, То же
1883	Охлаждение азота и оксида углерода	
1885	Замораживание азота	К. Ольшевский
1895	аргона	"
1897	кислорода	Д. Дьюар
1897	Охлаждение фтора	"
1895	Охлаждение воздуха с использованием дросселирования	К. Линде
1884	Охлаждение водорода: динамическое	К. Ольшевский
1898	статическое	Д. Дьюар
1898	Замораживание водорода	"
1902	Охлаждение воздуха с использованием дросселирования и детандера	Ж. Клод ¹
1908	Охлаждение гелия	Г. Камерлинг-Оннес

¹ О работах Ж. Клода рассказано в гл. 5.

¹ Им посвящено большое число научно-популярных изданий, краткий список которых приведен в конце книги.

нительно короткий исторический срок (около 130 лет) не только решить проблему ожижения газов, но и найти способы, позволяющие осуществлять этот процесс в промышленном масштабе.

Далее мы перейдем к истории еще одной области криогенной техники, возникновение которой стало возможным только после благополучного завершения всех работ по ожижению газов, — это низкотемпературное разделение газовых смесей, история которого начинается с перегонки, изобретенной еще в древнейшие времена.

Глава пятая

КРИОГЕНИКА НЕ ТОЛЬКО ОЖИЖАЕТ ГАЗЫ, НО И РАЗДЕЛЯЕТ ИХ СМЕСИ

*Наступило время перехода
от изучения атмосферы к использованию
ее богатств для получения продуктов
народнохозяйственного значения.*

К. Линде

5.1. ОТ ИСКУССТВА ПЕРЕГОНКИ — К НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ

Результаты, полученные К. Линде в работах 1894–1896 гг., положили начало еще одному, совершенно новому направлению криогеники — низкотемпературному разделению газовых смесей, в первую очередь воздуха.

В статье, опубликованной в английском журнале "Engineer" (1896 г.), К. Линде впервые написал об этом. "При ожижении воздуха физики всегда наблюдали, что обе его составные части (мы будем иметь в виду только азот и кислород) одинаково переходят в жидкое состояние, хотя температура кипения азота намного ниже, чем у кислорода. Однако, с другой стороны, при испарении более летучий азот отделяется сильнее; жидкость по мере испарения все больше обогащается кислоро-

дом"¹. И далее: "В новом аппарате, где сепарация жидкости происходит непосредственно в воздухе, проходящем через него, наблюдается такое же обогащение жидкости кислородом. Таким образом, становится очевидным, что если поставить целью создать аппарат, в котором будут происходить ожижение и последующее испарение, то задачу разделения можно реализовать, используя охлаждение и ожижение. И кислород, и азот могут быть выведены из машины как газы при обычных температурах, что позволяет оставить (рекуперировать) в аппарате количество холода, которое необходимо для их охлаждения и сжижения". Совершенно очевидно, что в этих строках дается совершенно четкая программа создания нового направления техники — разделения воздуха на кислород и азот новым способом, основанным на его ожижении.

К. Линде никогда не ограничивался только констатированием возможности создания чего-либо: он тут же приводит описание первого аппарата для разделения воздуха. Из этого очень простого и еще несовершенного устройства родилась усилиями многих исследователей и изобретателей в дальнейшем целая отрасль промышленности. Она дает теперь сотни миллионов кубометров в год кислорода, азота и многих других продуктов, выделяемых не только из воздуха, но и из природного газа, искусственных газовых смесей, получаемых на промышленных предприятиях и в сельском хозяйстве.

К. Линде несколько позже в значительной степени предсказал, опираясь на первые достижения, такое развитие этой области в своей публичной лекции, пророчески им названной "сокровища атмосферы" (Мюнхен, 1907 г.). Он отметил три этапа в отношениях людей с атмосферой. Первый этап составили "тысячелетия, когда люди вместе со всем органическим миром черпали из атмосферы существенные основы своего бытия, не выясняя при этом причины наблюдаемых процессов". Затем шел "охватывающий несколько столетий век ее научного исследования". И вот теперь наступил третий этап, когда "новейшие успешные достижения техники направлены на то, чтобы составные элементы атмосферного воздуха переработать в продукцию народнохозяйственного значения".

¹ В опытах Линде, описанных в гл. 4, ожиженный воздух содержал до 70% O₂ (при концентрации его в атмосферном воздухе 20,8%).

В целом он, применительно к своей теме, дал четкий обзор того, как, по его словам, "деятельный человек от чувственного восприятия и инстинктивного использования естественных сил перешел к исследованию их свойств и законов, а затем и к их техническому использованию"¹.

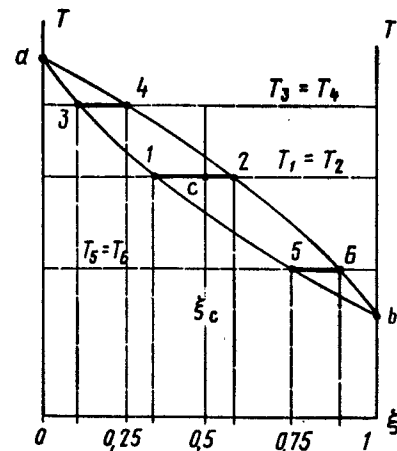
Третий научный комментарий. Чтобы понять ход работ Линде и его последователей по разделению ожиженных газовых смесей при низких температурах, необходимо хотя бы коротко познакомиться с их свойствами. Они, в принципе, ничем не отличаются от тех, которые характерны для газовых смесей при обычных температурах, близких к $T_{0.c}$. Эти свойства определяются законами, которые были открыты и теоретически обоснованы русским физико-химиком акад. Д. П. Коноваловым (1856–1929 гг.), учеником Д. И. Менделеева, в 80-е годы прошлого века. Законы Коновалова устанавливают связь между составами жидкой смеси двух веществ и пара над ней. Для разбора простейшего случая, который нам нужен, достаточно воспользоваться первым (из трех) законом Коновалова, который гласит: "Пар жидкой однородной смеси двух взаиморастворимых веществ (компонентов) относительно богаче тем компонентом, добавление которого понижает температуру кипения смеси при данном давлении".

Проанализируем на самом простом примере распространенной (иногда даже слишком распространенной) смеси этилового спирта и воды следствия первого закона Коновалова.

Известно, что температура кипения чистого спирта при атмосферном давлении составляет около 80°C , а воды при этих же условиях -100°C . Следовательно, вода здесь высококипящий компонент, а спирт – низкокипящий. Смесь $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ и H_2O кипит при промежуточных температурах; чем больше в ней низкокипящего компонента – спирта, тем температура кипения смеси ниже. Следовательно, именно спирт будет в данном случае тем компонентом, давление которого понижает температуру кипения смеси при данном давлении; по первому закону Коновалова его всегда будет в паре больше, чем в жидкости.

¹ Интересно, что здесь Линде в точности следует марксистской теории познания: вспомним знаменитую формулировку В. И. Ленина: "от живого созерцания к абстрактному мышлению, и от него – к практике".

Рис. 5.1. T, ξ -диаграмма смеси двух веществ



Эту зависимость удобно показать графически (рис. 5.1) на T, ξ -диаграмме. Кривые показывают зависимость температуры от концентрации: верхняя – для пара, нижняя – для жидкости. Так как температуры пара и жидкости, из которой он

образуется, равны, то по диаграмме легко установить состав пара по составу жидкости (и наоборот), проведя соответствующую горизонтальную линию – изотерму. Так, например, точка 1 соответствует жидкости с содержанием спирта 0,3 (т.е. 30%). Равновесный ей пар имеет температуру и состав, отражаемый положением точки 2; в нем спирта намного больше – около 60%. Аналогичная ситуация будет и при других концентрациях – как меньших (точки 3 и 4), так и больших (точки 5 и 6). Разница только в том, что концентрации пара и жидкости будут различаться меньше; в крайних точках a и b пар и жидкость имеют один состав – в первом случае будут состоять из чистой воды, во втором – из чистого спирта. T, ξ -диаграмма обладает еще одним полезным свойством. Точка c на изотерме, соответствующая парожидкостной смеси, лежащая между кривыми пара и жидкости, делит ее на две части. Отношение длин отрезка, прилегающего к линии жидкости ($1c$), и отрезка, прилегающего к линии пара ($c2$), равно отношению количеств пара и жидкости.

То, о чем говорилось выше, относится только к стационарному состоянию – равновесию между паром и жидкостью. Но для практических целей важно знать, что будет с жидкостью, если испарить ее значительную часть. Результаты такого процесса тоже можно ясно представить на T, ξ -диаграмме

¹ Концентрация (объемная или массовая доля) обычно выражается содержанием легкокипящего компонента (в данном случае спирта) в смеси.

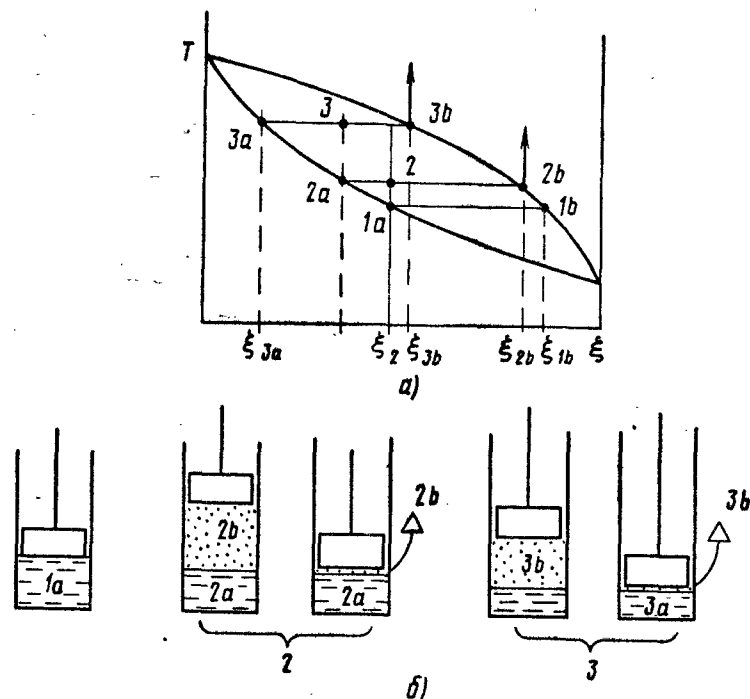


Рис. 5.2. Изменение составов жидкости и пара при периодическом отводе и прилившей части раствора на T, ξ -диаграмме:

а — T, ξ -диаграмма; б — модель процесса

(рис. 5.2, а). Если жидкость, имеющую состав ξ_2 и температуру T_1 (положение 1а, рис. 5.2, б) частично испарить, то общий состав ξ_2 системы пар + жидкость (положение 2) не изменится, а температура повысится до T_2 . Но теперь система будет состоять из жидкости, менее богатой спиртом (ξ_{2a}), и пара, более богатого им (ξ_{2b}). Если пар отвести, а жидкость снова частично испарить, то аналогичный процесс повторится (точки 3, 3а и 3б). Таким образом, в сосуде после этих операций останется часть жидкости состава ξ_{3a} , состоящая в основном из воды с относительно небольшой примесью спирта. Что касается пара, то его состав по мере испарения тоже будет меняться от ξ_{1b} до ξ_{2b} и ξ_{3b} ; концентрация спирта в нем (а следовательно, и в жидкости, которая может быть получена из него) будет тоже уменьшаться.

Описанные свойства растворов были (конечно, не в столь точной форме) известны еще в древнем Египте, и жрецы, под глубочайшим секретом, использовали их для получения спирта. Однако из предшествующего ясно, что непосредственно получить чистый легкокипящий продукт простым испарением в принципе нельзя. Действительно, пусть имеется исходный раствор, соответствующий точке 1а. Если начать его испарять, то в результате процессов, показанных на рис. 5.2, только первая порция пара будет иметь относительно высокую концентрацию ξ_{2b} , соответствующую точке 2. По мере испарения количество спирта в исходной жидкости будет уменьшаться и точка 1а будет смещаться влево в положения 2а, 3а и т.д. Соответственно и получаемый пар (точки 2б, 3б и т.д.) будет содержать все меньше спирта и больше воды. В примитивных самогонных аппаратах эту трудность частично компенсируют тем, что первые, лучшие порции продукта отделяют, заменяя сосуды, в которые сливается легкокипящий продукт. (Отсюда, кстати, и самогонный термин "первачок", относящийся к первой, наиболее концентрированной чистой порции.)

Очевидно, однако, что такая прямая "самогонная" перегонка несовершенна. Можно, конечно, проводить этот процесс перегонки многократно, вновь испаряя полученный продукт, но все же разделение получается неполным.

Поэтому еще в древности было придумано радикальное усовершенствование процесса перегонки — дефлегмация (от слова "флегма" — жидкость), т.е. повторная конденсация пара. Идея его очень проста и остроумна. Ведь при конденсации процесс идет так, что в жидкость переходит в большей степени высококипящий компонент; следовательно, при частичной конденсации пара, содержащего спирт и воду, в жидкость будет переходить больше воды, чем спирта, и пар будет очищаться от нее, а вода возвращаться в испаритель. Если, например, ожить пар состава ξ_2 (рис. 5.3) до точки 3, то из него получится жидкость состава ξ_{3a} , которая вернется в испаритель, а пар окажется дополнительно обогащенным (точка 3б).

Из таких соображений в результате проб и ошибок в ходе длительной эволюции, которую мы здесь подробно рассматривать не можем, возникли схемы, показанные на рис. 5.4. Первая из них основана на простом испарении части жидкости и последующей конденсации пара. Вторая — с дефлегматором, когда жидкость из него сразу возвращается в испаритель.

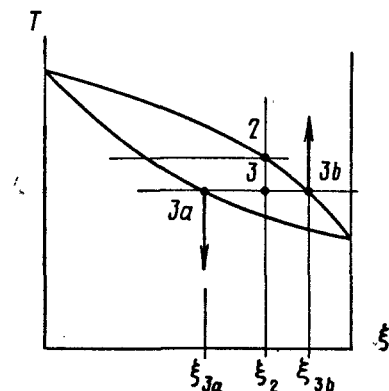


Рис. 5.3. Обогащение пара легкокипящим компонентом при частичной конденсации (дефлегмации)

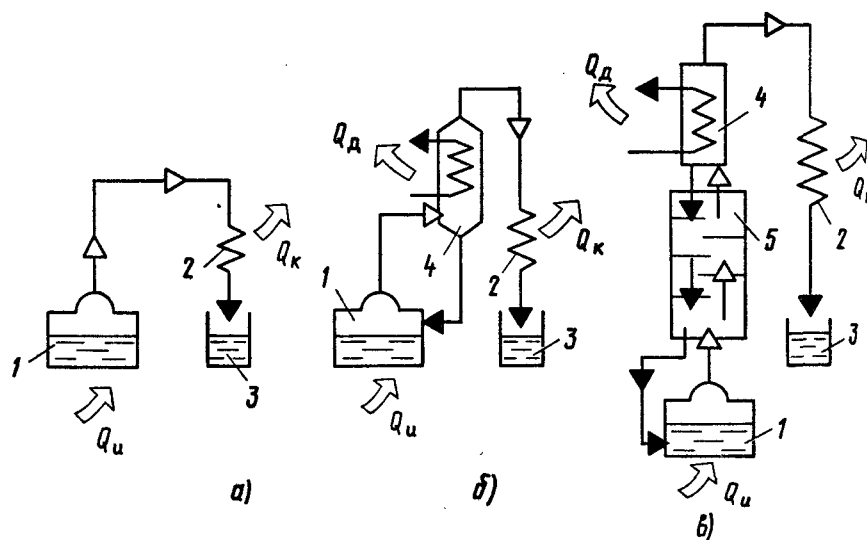


Рис. 5.4. Последовательное развитие процессов разделения:

а – простая перегонка; б – установка с дефлегматором; в – установка с ректификационной колонной; 1 – испаритель; 2 – конденсатор; 3 – сборник; 4 – дефлегматор; 5 – ректификационная колонна

Она дает более чистый легкокипящий продукт и позволяет извлечь его в большем количестве, поскольку остаток в испарителе будет содержать его меньше.

Усвоить все эти связи, не имея в своем распоряжении ни законов Коновалова, ни диаграмм, ни способов анализа сос-

тава смеси, довольно сложно. В конце средневековья, когда перегонку только начали применять для получения спирта из вина, к тем, кто мог это делать, относились с большим уважением. Это хорошо видно, например, из введения к книге по технологии, написанной в XVI в. Делла Порта. "Я начну с перегонки – изобретения последнего времени, поразительного дела, хвала которому выше сил человеческих; не той перегонке, которой пользуются невежды и неумелые люди – они применяют ее, но портят и разрушают добро; но той, которую выполняют искусные мастера... Невежде никогда не постигнуть искусство перегонки".

Попробуем все же постигнуть более совершенную третью схему перегонки, которая появилась уже позже (рис. 5.4, в). Здесь между испарителем и дефлегматором был установлен аппарат, названный ректификационной колонной¹. В ней поток более теплого пара, идущего из испарителя, движется навстречу более холодной жидкости, стекающей из дефлегматора. Колонна устроена так, чтобы способствовать контакту стекающей жидкости и поднимающегося пара². Как происходит их взаимодействие, можно видеть из схемы на рис. 5.5. На рис. 5.5, а показан процесс взаимодействия поднимающегося пара П и стекающей жидкости Ж некоторого уровня колонны (например, на одной из тарелок) на T, ξ -диаграмме. Для наглядности направление оси температур соответствует тому, чтобы возрастание их шло книзу в соответствии с тем, как это происходит в колонне.

Состояние пара П, подходящего к тарелке снизу, характеризуется точкой а, а жидкости, стекающей на нее сверху, точкой б. Разность температур пара и жидкости, поступающих на тарелку, $\Delta T = T_a - T_b$. При контакте пара и жидкости их температуры выравниваются до некоторой средней температуры T_m . При этом пар частично конденсируется (точка а'), а жидкость частично испаряется (точка б'). В результате взаимодействия из обоих потоков получается пар П', обогащенный легкокипя-

¹ От латинского слова rectificare – исправлять, улучшать.

² Для: этого колонна либо заполняется пористой "насадкой" (металлическими или керамическими частицами различной формы или сетками), либо в ней устанавливаются ректификационные тарелки (плоские перфорированные диски с отверстиями для прохода пара и патрубками для слива жидкости).

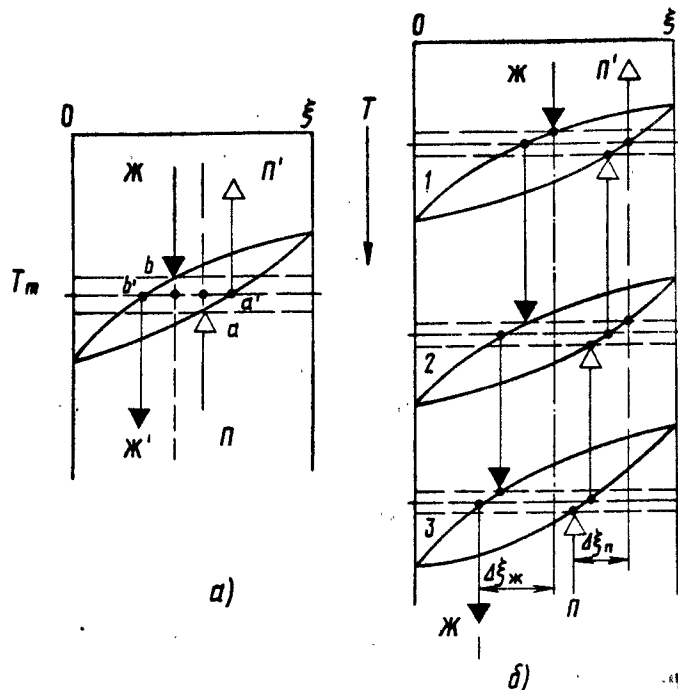


Рис. 5.5. Схема процессов в ректификационной колонне

щим компонентом (точка a'), и равновесная ему жидкость $Ж'$ обогащенная тяжелокипящим компонентом (точка b'). Таким образом, в конечном итоге пар обогащается легкокипящим компонентом (из $П$ получается $П'$), а жидкость тяжелокипящим компонентом (из $Ж$ получается $Ж'$).

Такие же процессы протекают и на других уровнях колонны как показано на рис. 5.5, б, где нанесены процессы на трех последовательно расположенных тарелках 1–3. В результате последовательных сдвигов концентраций вправо по мере движения пара вверх по колонне он на выходе из нее перед дефлегматором может практически представлять собой чистый легкокипящий компонент. Таким образом, схема на рис. 5.4, в может обеспечить получение из исходной смеси спирта предельно высокой концентрации. Нетрудно видеть, что процессы в ней полностью соответствуют тем, которые протекают в генераторе и дефлегматоре абсорбционной холодильной установки

с той лишь разницей, что роль легкокипящего компонента там играет аммиак NH_3 , а не спирт (см. гл. 6).

Смесь кислорода и азота, т.е. воздух (если не считать небольших примесей инертных газов, которые в первом приближении можно не рассматривать), полностью подчиняется описанным закономерностям. Разница в температурах кипения при атмосферном давлении между кислородом (90 К) и азотом (77 К), составляющая 13 К, меньше, чем в смесях H_2O и NH_3 , H_2O и C_2H_5 , но вполне достаточна для разделения.

Еще в первом варианте Линде для ожижения воздуха (см. рис. 4.5) было замечено, что собирающийся в сепараторе и затем сливаемый в виде продукта жидкий воздух обогащен кислородом. Это и естественно: при дросселировании в аппарате Линде охлаждается менее 10% воздуха. В этом случае жидкость, как видно из T, ξ -диаграммы рис. 5.1, должна быть значительно обогащена кислородом (более 60%). Если учесть, что при сливе жидкости часть ее испаряется (а в пар уходит преимущественно азот), то обогащение кислородом будет еще больше¹.

Однако получение обогащенного кислородом жидкого воздуха не решало задачи: нужно было непосредственно получать газообразный кислород высокой концентрации. Схема первого аппарата, созданного Линде для этой цели, показана на рис. 5.6. Видно, что он очень похож на первый его ожижитель воздуха (см. рис. 4.5, а). Сжатый воздух, поступающий из компрессора, разделяется в точке a на два потока: один идет по внутренней трубке с змеевика O , а другой – по трубке d змеевика N . После охлаждения обратными потоками отходящих газов, идущих в кольцевом пространстве змеевиков, оба потока в точке b соединяются и подаются в змеевик S , погруженный в ванну с жидким воздухом. Здесь сжатый воздух охлаждается и дросселируется в вентиле r , после чего сливается в ту же ванну W . Находящаяся в ней жидкость кипит, так как нагревается воздухом, конденсирующимся в змеевике.

¹ Незнание этого свойства жидкого воздуха многократно приводило к несчастным случаям (пожарам и взрывам). Наивно полагая, что жидкий воздух имеет тот же состав, что и атмосферный, некоторые экспериментаторы соотвественно с ним и обращались, забывая, что имеют дело практически с кислородом. А фамильярность в отношении с кислородом (особенно жидким) недопустима: к нему надо обращаться на "Вы"!

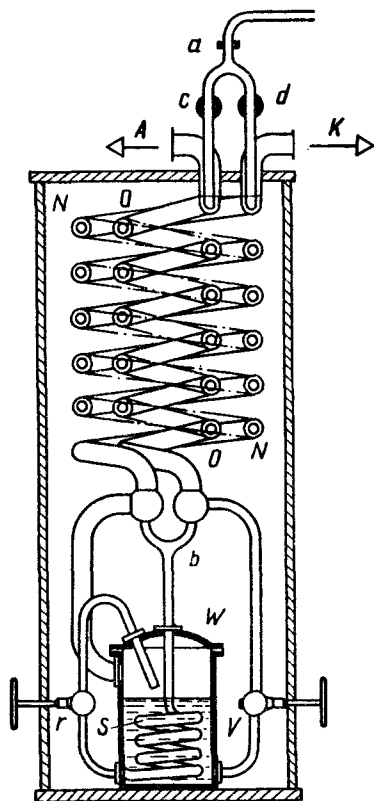


Рис. 5.6. Первая воздухоразделительная установка К. Линде

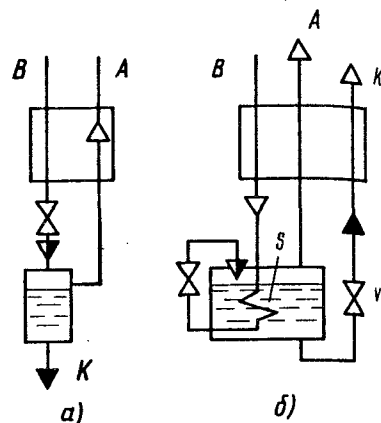


Рис. 5.7. Два варианта получения воздуха, обогащенного кислородом:

а — простой отбор жидкости; б — частичное испарение жидкости в отдельном змеевике

Из сосуда отводятся два продукта: холодный пар (из верхней его части), обогащенный азотом, и жидкость, обогащенная кислородом. Количество отбираемой жидкости регулируется вентилем r так, чтобы уровень в сосуде поддерживать неизменным. Два обратных потока продуктов разделения нагреваются в соответствующих змеевиках и выводятся в виде газобразных продуктов A и K .

Такая система несомненно лучше, чем простое ожижение воздуха, как предлагал Линде, с отдельным отбором пара и жидкости, обогащенной кислородом. На рис. 5.7 показаны упрощенные схемы обоих вариантов. В схеме рис. 5.7, а, соответствующей аппарату на рис. 4.5, получается просто жидкость, обогащенная кислородом, и продукт A , обогащенный азотом. В схеме рис. 5.7, б, соответствующей аппарату рис. 5.6, имеются два отличия. Первое состоит в том, что обогащенный кислород

дом жидкий воздух K не выводится сразу, а испаряется в теплообменнике, охлаждая часть поступающего сжатого воздуха B . Соответственно холод не теряется, а рекуперируется, что позволяет снизить расход энергии. Кроме этого, продукт получается в виде газа и сразу может быть использован.

Второе отличие связано с тем, что жидкий воздух в сборнике постоянно кипит, поскольку к нему подводится тепло от змеевика S . Введение этого змеевика — одно из частных, но очень важных нововведений Линде. Действительно, в установках, работающих при температурах выше $T_{0.c}$ (например, при разделении спирта и воды), осуществить кипение легко. Внешний нагрев можно делать, например, огнем или паром. Здесь же тепло извне подводить, в принципе, нельзя: холод достается очень дорого. К. Линде осуществил подогрев за счет "внутренних ресурсов", без какого-либо подвода тепла извне.

К. Линде рассчитывал, что благодаря этому подогреву из жидкости будет дополнительно удаляться оставшийся в ней азот как легкокипящий компонент. Тогда в жидкости, уходящей через вентиль V , остается почти чистый кислород. Однако этот расчет оправдался лишь частично, поскольку сверху в сосуд все время вливался жидкий воздух, содержащий много азота; эта жидкость загрязняла жидкий кислород. К. Линде довольно быстро понял, как устранить этот недостаток: ведь решение задачи разделения "теплых" смесей уже существовало — это была ректификация.

Нужно было жидкий воздух, сливающийся сверху, сначала очистить от азота, пропустив его через ректификационную колонну, навстречу пару, идущему от кипящей в сборнике жидкости. К. Линде так и сделал, создав тем самым первую воздухо-разделительную установку, действие которой основано на низкотемпературной ректификации. На рис. 5.8 показана соответствующая схема. Здесь жидкий воздух B не сразу попадает в испаритель, а стекая по колонне, постепенно освобождается от азота и сливается, внизу практически не отличаясь по составу от кипящего жидкого кислорода K . Пары, поднимающиеся по колонне, напротив, постепенно обогащаются азотом A и выходят из колонны в состоянии, близком к равновесию с поступающим воздухом, т.е. содержат примерно 92–93% азота ($\xi_A = 0,92 \div 0,93$).

Таким образом, задача получения из воздуха чистого кислорода была решена. Его можно было либо отводить из испарителя

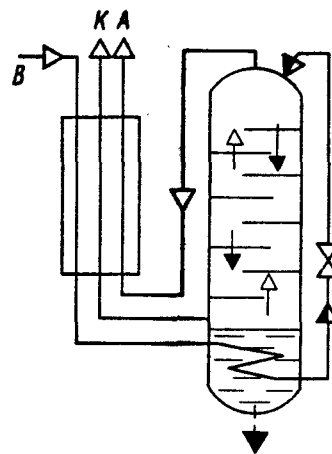


Рис. 5.8. Схема воздухоразделительной колонны однократной ректификации

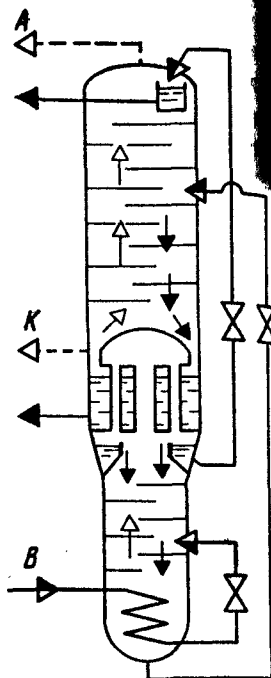


Рис. 5.9. Схема колонны двойной ректификации, изобретенной К. Линде.

непосредственно наружу в виде жидкости, либо направлять в теплообменник в виде пара, нагревать в нем до температуры окружающей среды и только после этого выдавать потребителю.

Воздухоразделительные установки Линде стали распространяться и быстро вытеснили старые аппараты, где дорогой кислород получался химическими методами. Усовершенствованием низкотемпературного разделения воздуха занялись в это время такие изобретатели, как Ж. Клод, известный нам Р. Пикте и др. Продолжал работу и К. Линде, сохраняя еще долго лидерство.

Главной задачей в это время было получение не только чистого кислорода, но одновременно с ним и чистого азота, а затем и инертных газов (т.е. полное разделение воздуха).

История инертных газов очень интересна и заслуживает отдельного рассмотрения, которое мы проведем в § 5.3. Что касается получения одновременно с кислородом чистого азота, то стремление к этому объяснялось не только (и не столько) желанием иметь этот продукт; в то время он еще не был

жен в столь больших количествах. Дело было в другом: ведь с грязным азотом уходила и терялась некоторая часть кислорода, что заметно уменьшало производительность установки. Если отводить чистый азот, то производительность установки соответственно возрастает. Естественно поэтому, что задача получения чистого азота (т.е. полного извлечения кислорода) при разделении воздуха была очень актуальной.

Среди тех, кто работал в этих двух направлениях, наиболее существенных успехов удалось достигнуть К. Линде и французу Жоржу Клоду (1870–1960 гг.) — ученику уже известного нам Л'Арсонваля, одного из изобретателей сосудов с вакуумной изоляцией.

И Линде, и Клод, работая над способами полного разделения воздуха на кислород и азот, шли довольно близкими путями. Идея состояла в том, чтобы проводить процесс разделения в две стадии — сначала получать чистый азот и воздух, только обогащенный кислородом, а затем из него и чистый кислород. Разница была только в том, что для первой стадии процесса Клод применил дефлегмацию, а Линде — ректификацию. В дальнейшем практика показала, что вариант Линде оказался более удобным и надежным. Поэтому его ректификационная колонна для разделения воздуха ("колонна двойной ректификации") используется практически во всех воздухоразделительных установках. Даже фирма "Лэр Лирид", организованная Клодом (и существующая до сих пор), перешла на использование такой колонны. Изобретенная и запатентованная в 1907 г., она, конечно, существенно усовершенствована за прошедшие годы, но основная идея, лежащая в основе ее работы, не изменилась до сих пор. Таким долголетием в эпоху НТР отличаются очень немногие технические устройства.

Принципиальная схема аппарата двойной ректификации показана на рис. 5.9. Видно, что он состоит из двух ректификационных колонн, поставленных одна на другую и соединенных последовательно. В первой (нижней) происходит предварительное разделение воздуха В на азот А, получающийся в верхней ее части, и обогащенный кислородом воздух (36–38% O_2), собирающийся внизу, в испарителе. Для этого воздух, охлаждающийся в змеевике, находящемся в испарителе, через дроссель подается в среднюю часть колонны. Пар идет наверх, в конденсатор, а жидкость стекает в испаритель. Оба продукта, получаемые в нижней колонне, в жидком виде через дроссельные вен-

тили подаются в верхнюю колонну, где и происходит их окончательное разделение.

Мы видели, что для полного разделения двухкомпонентной смеси ректификацией необходимо, чтобы сверху в нее сливался жидкий низкокипящий компонент, а снизу поступал пар высококипящего компонента. Именно такая ситуация создается в верхней колонне аппарата Линде с двойной ректификацией.

Разделяемая смесь подается в середину верхней колонны. Пар, двигаясь вверх, обогащается азотом, а жидкость, стекающая вниз, — кислородом, в соответствии с процессами, показанными на рис. 5.5. Готовые продукты разделения — технически чистые кислород и азот отводятся из колонны либо в газообразном (штриховые линии), либо в жидком виде (сплошные линии). В первом случае они подаются в регенеративный теплообменник, где нагреваются, охлаждая сжатый воздух, поступающий на разделение.

Красота идеи, положенной в основу колонны двойной ректификации, определяется тем, что как подогрев, обеспечивающий поток пара в верхней колонне, так и конденсация, создающая стекание вниз жидкости в ней, обеспечиваются без внешних подвода и отвода тепла. Колонна в этом отношении поставлена на "самообслуживание". Действительно, теплообменный аппарат, соединяющий нижнюю и верхнюю колонны, служит в первой из них конденсатором для азота, который обеспечивает флегмой обе колонны, и во второй — испарителем, обеспечивая в ней поток пара. Поэтому он и называется "конденсатор-испаритель".

Для конденсации азота в нижней колонне при испарении кислорода в верхней его давление должно быть около 0,5 МПа, чтобы температура его конденсации была 92–93 К, т.е. превышала температуру кипения кислорода в верхней колонне. Интересно, что это давление в нижней колонне поддерживается само, автоматически. Действительно, если оно снизится, то конденсация прекратится и газообразный азот, оставшийся неожиженным, сразу автоматически поднимет давление. Это классический пример отрицательной обратной связи, обеспечивающей саморегулирование процесса; ее наличие характерно для лучших и наиболее "живучих" технических систем.

5.2. ЭНЕРГЕТИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ

Введением в технику разделения воздуха колонны двойной ректификации задача полного его разделения на кислород и азот была решена. Однако оставалась вторая задача — снижение расхода энергии в воздуходелительных установках. Получение 1 л жидкого кислорода требовало затраты электроэнергии не менее 3 кВт·ч, а 1 м³ газообразного — 1,5 кВт·ч (как говорили тогда, 4,1 и 2 "час-лошади" соответственно). Нужно было снизить эти показатели по крайней мере в 2–3 раза¹. Намечались два пути совершенствования классического дроссельного цикла.

Первый из них, основанный также на дросселировании, развивал сам К. Линде; второй, опиравшийся на введение детандера в технику разделения воздуха, разрабатывал Ж. Клод.

Принципиальная основа как того, так и другого способа, несмотря на их существенное различие, была одна и та же. Ни Линде, ни Клод не осознавали этого в полной мере, думая, что идут принципиально различными, даже противостоящими, путями. Однако с энергетической точки зрения задача и у того, и у другого была одна и та же: ликвидировать (точнее — существенно уменьшить) основной недостаток цикла Линде. Именно этот принципиальный недостаток и приводил в нем к большому расходу энергии.

В чем же дело?

Посмотрим на схему классического цикла Линде (см. рис. 4.5). Она, как видно из рис. 4.18 и 4.19, входит как составная часть неизменно во все системы ожижения и разделения воздуха. Охлаждение сжатого воздуха в них осуществляется в теплообменнике потоком идущего навстречу расширенного воздуха (или продуктов его разделения — азота и кислорода). Во всех случаях (независимо от конструкции теплообменника — Линде, Хэмпсона и др.) наблюдается одно и то же явление. Сжатый воздух, направляющийся к дросселю, охлаждается на меньшее число градусов, чем нагревается выходящий воздух (или продукты его разделения — кислород и азот). Это

¹ Теоретические расчеты, которые в то время уже умели делать, показывали, что в идеальном случае расход энергии на получение 1 л жидкого кислорода из атмосферного воздуха должен составлять около 0,2 кВт·ч, а газообразного — 0,045 кВт·ч/м³. Другими словами, КПД жидкостной установки был $0,2 \cdot 100 / 3 = 6,7\%$, а газовой — $0,045 \cdot 100 / 1,5 = 3\%$.

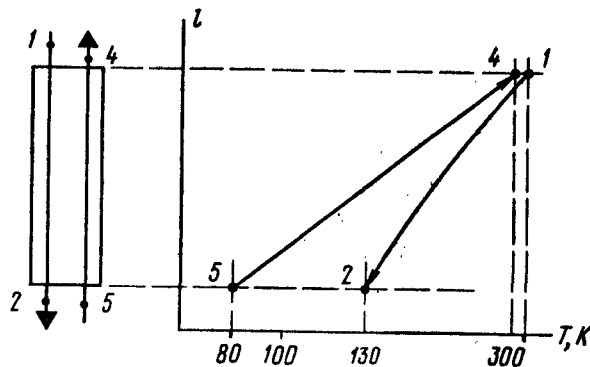


Рис. 5.10. График протекания температур прямого (1—2) и обратного (5—4) потоков воздуха в ожежительной установке Линде

наглядно можно показать на графике рис. 5.10. Здесь по оси ординат отложена длина теплообменника l , а по оси абсцисс — температуры потоков в теплообменнике.

Теплый конец теплообменника, как и на схемах, расположен вверх, холодный — вниз. Видно, что в то время как выходящий поток неожиженного воздуха нагревается на $283 - 79 = 204$ K, сжатый воздух охлаждается только на $293 - 130 = 163$ K. Аналогичная ситуация складывается и при разделении воздуха, хотя в этом случае разница температур меньше. Такое "недоохлаждение" сжатого воздуха объясняется двумя причинами. Во-первых, количество расширенного воздуха меньше, чем сжатого (часть воздуха отведена в виде жидкости и обратно в теплообменник уже не попадает). Во-вторых, теплоемкость сжатого воздуха намного больше, чем расширенного. Поэтому, отдавая в теплообменнике то же количество тепла, что получает нагревающийся поток, он охлаждается на меньшее число градусов, чем то, на которое тот нагревается. То же происходит и в разделительной установке, выдающей газообразные продукты разделения, но, поскольку жидкость в этом случае не отводится, действует только вторая причина; однако и здесь недоохлаждение прямого потока очень заметно.

Возникает вопрос — а нужно ли по этому поводу так огорчаться? Пускай себе сжатый воздух будет охлаждаться меньше. Чем это плохо?

Оказывается, что именно это "недоохлаждение" сжатого воздуха (или другого газа, если перерабатывается не воздух) и приводит к потерям, вызывающим большой перерасход энергии на привод установки (т.е. на сжатие воздуха). Первая из потерь связана именно с тем, что в теплообменнике теряется "качество", потенциал холода (по табл. 2.1 видно, как он зависит от температуры). Если бы воздух охлаждался в теплообменнике до температур, близких к температурам обратного потока (хотя бы до 95–100 K), то этой потери почти бы не было. Вторая потеря связана с работой дросселя. Чем ниже температура перед ним, тем эффективнее он работает как охлаждающее устройство и тем большая часть воздуха (или другого газа) в нем ожежается. А температура перед дросселем — это и есть температура после теплообменника.

Таким образом, главный путь совершенствования процесса Линде, в конечном счете, сводился к уменьшению разности температур в теплообменнике в результате снижения температуры охлаждаемого сжатого газа.

Как подошел к решению задачи К. Линде? Он и при этом остался верным своей приверженности к дросселированию как способу охлаждения. Начал он с того, что разработал так называемый "цикл двух давлений воздуха", в котором дросселирование производилось на двух разных потоках и температурных уровнях. Это давало некоторые преимущества в расходе энергии, но усложняло установку. Однако, в конечном счете, Линде пришел к очень простому и логичному решению: он призвал на помощь свое старое, проверенное детище — аммиачную холодильную установку и подключил ее в воздушный дроссельный цикл.

Как видно из рис. 5.11, поток сжатого воздуха охлаждался обратным потоком в теплообменнике только выше сечения $a-a$ и ниже сечения $b-b$. В промежутке производилось дополнительное охлаждение кипящим аммиаком в испарителе холодильной установки. В результате разность температур в холодной нижней части теплообменника (а соответственно и потери) существенно сократилась и температура перед дросселем (в точке 2) намного снизилась. Дроссель стал работать эффективнее, и доля ожеженного воздуха после него значительно увеличилась. Цель, таким образом, была достигнута: давление сжатого воздуха можно было снизить и затраты энергии на сжатие соответственно уменьшить. Правда, за это

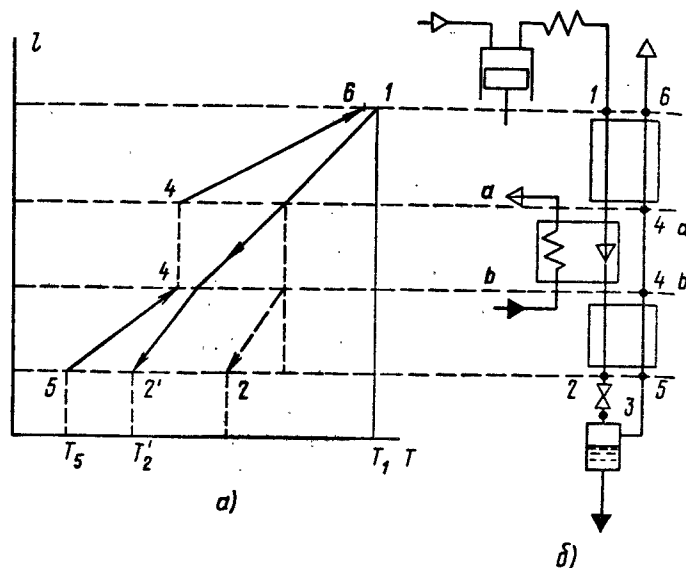


Рис. 5.11. График (а) протекания температур прямого (1–2) и обратного (5–4) потоков воздуха в ожижительной установке Линде (б) с дополнительным аммиачным охлаждением

пришлось заплатить определенную цену: установка несколько усложнилась и главное – холодильная машина потребовала дополнительного расхода энергии. Однако введение надежной и хорошо отработанной холодильной машины ненамного увеличило стоимость установки (тем более что основной компрессор стал проще и дешевле). Что касается энергии, то ее экономия на воздушном компрессоре намного превзошла расход на аммиачном. В результате расход энергии на получение жидкого воздуха снизился почти в 2 раза по сравнению с простым дроссельным циклом.

Выпускаемые фирмой Линде установки разделения воздуха с колонной двойной ректификации и дополнительным аммиачным охлаждением нашли широкое распространение и выпускались вплоть до 30-х годов.

Ж. Клод, тоже работая над ожижением воздуха, пошел принципиально другим путем – он сделал ставку на самый первый способ охлаждения – расширение с отдачей внешней работы. Другими словами, он решил положить в основу промышленного процесса ожижения воздуха не дроссель, а детандер.

Задача была очень трудной. Вспомним, что и Сименс, и Сольвей потерпели поражение в попытках осуществить низкотемпературный воздушный цикл на детандере – технические трудности преодолеть не удалось. Правда, воздушные холодильные машины Горри и его последователей исправно работали с поршневыми детандерами, но в них была не очень низкая температура (не ниже -16°C). Это позволило даже применять обычную смазку пары поршень–цилиндр и те технические решения, которые использовались в паровых машинах.



Рис. 5.12. Жорж Клод

В этом же случае предстояло создать такую машину при температурах -100°C и ниже, что еще никому не удавалось. Сольвей в своем сообщении (1895 г.) на заседании Академии наук говорил: "Наиболее низкая температура, которую я мог достичь, была -95°C ".

В подходе Линде и Клода к этой задаче, возможно, сказалось в определенной степени развитие стиля национальных научно-инженерных школ: следствие того, о чем писал А. Блок, противопоставляя "острый галльский смысл" и "сумрачный германский гений". К. Линде – "германский гений" очень трезво оценивал трудности решения этой задачи. Он в 1896 г. писал: "Практическое осуществление этого процесса (теоретически неоспоримого) сомнительно по следующим причинам. Предположим, что в этом процессе применен атмосферный воздух при температуре, которая нужна для его ожижения; при этой температуре все вещества, содержащиеся в воздухе как примеси: вода, диоксид углерода и другие, так же, как и остатки применяемых смазываемых материалов, перешли бы в твердое состояние. В этих условиях стала бы невозможной работа цилиндра расширения и его распределительных механизмов. Те лица, которым приходилось иметь дело с такими низкими температурами, знают по опыту, насколько трудно в этих условиях даже управление простым вентилем. Вместе с тем было бы чрезвычайно трудно или даже невозможно защитить с необходимой для таких низких температур тщательностью как

сам расширительный цилиндр, так и его механизмы от влияния внешнего тепла, и, следовательно, этот способ совершенен для получения этих низких температур".

Ж. Клод пренебрег этими опасностями, с чисто французской отвагой отбросил эти предостережения и взялся за дело, надеясь на "острый галльский смысл".

Как мы увидим дальше, он действительно успешно решил задачу, но, разумеется, далеко не сразу.

Ж. Клод (1870–1960 гг.) был очень разносторонним инженером с весьма широким кругом интересов. Первой его серьезной работой было создание совместно с А. Гесс (1895–1896 гг.) способа хранения и перевозки ацетилена в виде раствора его в ацетоне. До этого ацетилен хранился в сжатом виде. Будучи очень неустойчивым соединением, он часто взрывался, несмотря на все меры безопасности. Способ хранения и транспортировки ацетилена, разработанный Клодом, используется до сих пор.

Работа над детандером и его применением, которой он занялся после этого, связала его навсегда с криогеникой. Ожидание и разделение воздуха стало его основной задачей. Он много и успешно занимался процессами извлечения и очистки инертных газов, а также их промышленным использованием. Позже Клод провел исследование взрывчатых веществ на основе жидкого кислорода. Кислородная бомба Клода–Д'Арсонваль, к которой мы в дальнейшем еще вернемся, наделала в свое время много шума. Он уделил много сил и использованию кислорода для медицинских целей, применению его в спасательных, а также водолазных костюмах. В 20-е годы он совместно с Бушери увлекся проблемой создания энергетических установок на основе использования разности температур на поверхности и в глубине океана в южных широтах. Опытная электростанция по системе Клода–Бушери даже была сооружена на Кубе.

Друг и покровитель Клода Д'Арсонваль писал о нем так: "Клод принадлежит к тем блестящим изыскателям, у которых пытливая наблюдательность лабораторного исследователя соединяется с трезвым разумом практика". Действительно, в большинстве своих работ Клод оправдал эту характеристику.

Как бы ни был широк круг задач, которыми занимался Клод, все же основной областью, в которой он работал, была криогеника, а главным его детищем – создание детандера и разработка путей его использования.

Перед тем как перейти к описанию хода этих работ, полезно привести соображения Клода по поводу заключения Линде о бесперспективности работы над детандером. Клод писал об этом так.

"Было ли это заключение бесспорным? Следовало ли признать его непреложность, считаясь с авторитетом создателя этой теории, тем более, что такого мнения придерживались и другие исследователи – Сименс, Сольвей, Хэмпсон и др.?"

Мне казалось, что нет. При научных изысканиях существует правило, бесспорная справедливость которого подтверждается всей историей прогресса и о существовании которого я всегда помню.

Когда доказана теоретическая возможность осуществления чего-либо, и лишь практические трудности мешают это выполнить, то весьма и весьма вероятно, что эти затруднения можно преодолеть ценой затраты большего или меньшего количества времени и труда, и можно найти какой-нибудь способ претворить задуманное в действительность и тем самым удовлетворить теорию".

Это прекрасное и мобилизующее правило в принципе верно. Однако в более трудных случаях в дело бывает вовлечена не одна завершенная теория "в чистом виде", а несколько, причем среди этих теорий может оказаться и незавершенная, все стороны которой еще не ясны.

Так что дорога к новому может быть и сложнее, чем по "формуле Клода".

Чтобы не впасть в пессимизм, нужно иметь в виду, что существует и другая, более приятная возможность. Бывает так, что, не смотря на то, что теория отрицает возможность осуществления чего-либо, оно оказывается все же осуществимым. В дело вмешиваются (или вводятся) не предусматриваемые основной теорией новые факторы. Такой пример будет рассмотрен в гл. 8, применительно к дальнейшему усовершенствованию дроссельного цикла Линде.

В самом начале работы по созданию поршневого детандера на пути Клода встали все те трудности, которые предсказывал Линде. Две из них оказались не такими уж страшными и были вскоре устранены.

Примеси воздуха, которые могли вымерзнуть в машине, были практически полностью удалены в результате предварительной очистки и осушки воздуха, которые все равно нужно было делать.

Приток тепла к цилиндру извне также оказался неопытным, поскольку его можно было поместить в кожух с изоляцией.

Однако третья трудность – проведение смазки цилиндра оказалась самой коварной.

Вначале Клод думал произвести смазку красивым металлом – использовать для этого получаемый в конце расширения жидкий воздух. Но чтобы получить такую смазку, нужно было сначала пустить теплый детандер и охладить его до нужной температуры. Получался заколдованный круг – чтобы пустить машину, нужен жидкий воздух, а чтобы его получить, нужно пустить машину.

Блестящая идея погибла в зародыше. Следующий вариант был менее экзотическим, но более реальным.

Еще из опытов Кольрауша (1896 г.), работавшего над жидкостными термометрами для измерения низких температур, было известно, что многие углеводороды, добываемые из нефти, – легкие бензины – петролейные эфиры (как их в то время называли), пентан и другие имеют низкие температуры затвердевания. Когда Клод столкнулся с этими жидкостями и узнал, что некоторые из них не затвердевают и при $t < -100^\circ\text{C}$, у него тут же возникла мысль применить их для смазки поршня детандера. Он решил, что "применяя при пуске в ход машины обычные смазочные вещества и переходя при очень низких температурах на смазку одним петролейным эфиром", можно добиться цели.

К концу 1899 г. был изготовлен стенд на основе небольшого вертикального воздушного поршневого двигателя и теплообменника, в котором сжатый до 1,2 МПа воздух перед поступлением в детандер охлаждался выходящим из него расширенным воздухом. Машина была снабжена обыкновенной масляной под давлением; по мере охлаждения в масло добавлялся петролейный эфир. Испытания проводились ночью под навесом для трамваев на конечной станции линии Бастилия–Шарантон в Париже.

Это были условия научной работы, очень не похожие на те, которые были в лабораториях Линде или Камерлинг-Оннеса.

Тем не менее опыт шел успешно. Детандер стал быстро охлаждаться. Столбик толуолового термометра, измерявшего температуру выходящего из детандера воздуха, быстро опускался, перешел черту -150°C , и наконец толуол даже замерз. Спус-

тя несколько минут машина остановилась, но это не огорчило изобретателя. Для первого раза все было блестяще! Полный надежд, он уселся в трамвай и направился домой. Назавтра с помощью средств, которые, узнав, наконец, об успехе, собрали поддерживавшие его друзья, он приступил к продолжению работы, которая в 1902 г. привела к созданию вполне работоспособного детандера, позволившего получить жидкий воздух.

Прежде чем перейти к описанию этих результатов, нужно отметить одно курьезное, но поучительное обстоятельство, о котором поведал после сам Ж. Клод. Дело в том, что несколько лет спустя, работая с толуолом, он установил, что тот затвердевает даже раньше, чем температура понижается до -100°C ! Это означало, что "трамвайный" опыт 1899 г., вызвавший такой энтузиазм, не дал, по существу, ничего нового; шкала термометра была неверной, и никаких -150°C получено не было. По существу, был только повторен результат Сольвея.

Оказывается, что иногда и грубая ошибка измерения может быть полезной и уберечь от преждевременной остановки перспективной работы!

Успешное завершение работ с детандером, однако, не дало возможности Клоду получить жидкий воздух непосредственно после детандера, как он хотел, следуя по стопам Сольвея. Это и естественно: в области, близкой к температуре жидкого воздуха, при атмосферном давлении детандер Клода не мог работать¹. Поэтому в конце концов Клод отказался от этой идеи. Он принужден был разделить сжатый воздух на две части: одну направлять в детандер, а другую – в теплообменник противотоком к расширенному в детандере холодному воздуху, как показано на рис. 5.13, а. Сжатый воздух при этом ожижался и после дросселирования до атмосферного давления мог использоваться как конечный продукт. Таким образом, Клод тоже пришел к классическому циклу с дросселированием. Однако, в отличие от Линде, он использовался для дополнительного охлаждения не пароконденсационную холодильную установку, а детандер, в котором расширялась и охлаждалась часть поступающего сжатого воздуха. Схема такого процесса, названного именем Клода, показана на рис. 5.13, б; из нее

¹ Так называемые "двухфазные" детандеры, в которых производилось частичное ожижение газов, появились только сравнительно недавно – в 70-е годы.

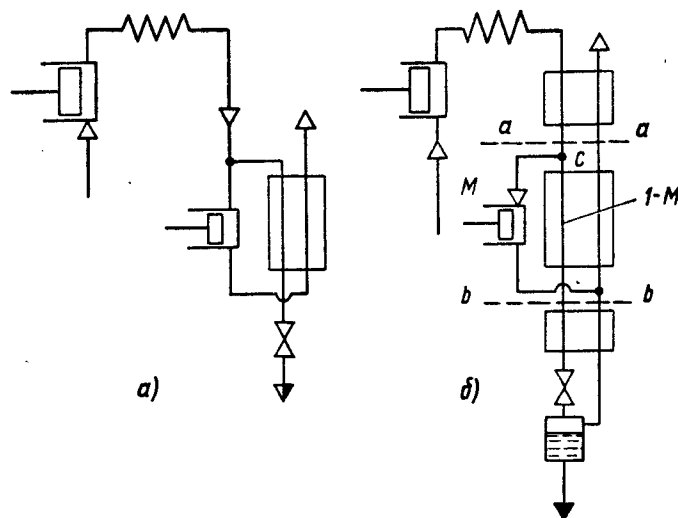


Рис. 5.13. Схема включения детандера в установке Клода:
а — первый вариант; б — промышленный вариант

видно, что сжатый воздух после охлаждения в предварительном теплообменнике разделяется на две части. Одна, M (50–60%), направляется в детандер. Другая его часть, $I-M$, продолжает охлаждаться обратным потоком в следующем по ходу теплообменнике. Холодный воздух после детандера возвращается в обратный поток и вместе с той его частью, которая не ожижалась, охлаждает идущий противотоком сжатый воздух. В конечном теплообменнике происходит окончательное охлаждение сжатого воздуха перед дросселированием.

Нетрудно видеть, что как в верхней части (выше сечения $a-a$), так и в нижней (ниже сечения $b-b$) процесс Клода ничем не отличается от процесса Линде с предварительным охлаждением. Введение детандера привело, в конечном счете, к тому же результату: уменьшилась разность температур в холодной части теплообменника и понизилась температура перед дросселем.

Однако между ними есть и существенная разница. Она состоит в том, что аммиачная (или другая) холодильная установка требует дополнительной затраты работы на привод, в то время как детандер, напротив, возвращает часть работы, уменьшая ее общий расход. В результате процесс Клода ок-

зался более экономичным и постепенно занял ведущее положение в установках разделения воздуха, обеспечивая удельный расход энергии на получение газообразного кислорода в зависимости от их размера 0,8–0,6 кВт·ч/м³. Установки представляли собой некий "гибрид" колонны двойной ректификации Линде и цикла с детандером Клода.

Сам детандер постепенно претерпел серьезную эволюцию. Ж. Клод отказался от петролейного эфира — это было очень сложно для промышленной эксплуатации, не говоря уже о том, что эта примесь "лезла" с воздухом в установку, создавая массу неприятностей. Было найдено другое, более простое решение. Фирма "Лэр Ликид" стала выпускать детандеры вообще без смазки цилиндров. Поршень уплотнялся "всухую" кожаными манжетами, пропитанными парафином с добавками, уменьшающими трение. Такие манжеты работали несколько тысяч часов без замены; правда, они не позволяли увеличивать частоту вращения детандера более 150–200 мин⁻¹. Однако этого было вполне достаточно для масштаба установок 10–20-х годов производительностью не более 250 м³/ч кислорода или соответствующего количества азота¹.

Другой вариант промышленного детандера был разработан в Германии Гейландтом. Он модифицировал процесс Клода так, что отвод воздуха в детандер (рис. 5.13, точка c) производился при относительно высоких температурах. Оказалось, что в этих условиях цилиндр детандера можно смазывать обыкновенным маслом с низкой температурой затвердевания, а цилиндр даже не изолировать. Некоторое количество масла, уносимое холодным воздухом из детандера в виде тумана, задерживалось специальными тканевыми фильтрами. Схема Гейландта оказалась при давлении воздуха 16–20 МПа очень выгодной для установок, производящих жидкий кислород, и они получили в 20-е годы широкое распространение.

Таким образом, на основе работ Линде, Клода и других в первой четверти нашего века была создана промышленная база для получения как газообразных, так и жидких продуктов

¹ Если продуктов нужно было больше, то задача решалась просто: наращивалось число установок. На одном из американских заводов по производству цианамиды было установлено 300 (!) аппаратов Клода, каждый производительностью 500 м³/ч азота.

разделения воздуха, удовлетворяющая еще не очень большим потребностям в этих продуктах. И все же уникальные возможности, которые открываются при использовании кислорода – как жидкого, так и газообразного, в это время трудно было предвидеть. Даже писатели-фантасты не касались этой темы. Только Ж. Верн, еще в 1874 г., когда получение больших количеств кислорода из воздуха было весьма далекой перспективой, написал замечательную повесть "Фантазии доктора Окса". В ней внимание уделялось не столько технологии получения кислорода из воздуха, сколько тем возможностям, которые дает обогащение воздуха кислородом. При этом Ж. Верн смотрел далеко вперед – мы еще увидим, какие результаты в технике и медицине это может дать.

В повести Ж. Верна биологические последствия действия кислорода представлены в блестящей, полной юмора форме¹.

Действие происходит в маленьком тихом городке на юге Франции – Кикандоне (название, естественно, вымышленное). Ж. Верн даже точно указывает численность его населения – 2393 человека! Сюда приехали два странных человека – доктор Окс и его помощник Иген (от "оксиген" – кислород). Доктор предлагает жителям городка построить у них газовый завод и систему освещения. Кикандонцы, даже не мечтавшие о такой возможности (тем более что гость предлагает провести все работы за свой счет), с радостью соглашаются. Доктор так обаятелен, денег тратить не надо – а это главное... Сооружается завод, в дома прокладываются трубопроводы – дело идет к концу... Но тут начинаются странные события. Все живое в городе начинает проявлять бурную энергию – от кошек и собак до лошадей и ... самих кикандонцев. Все ведут себя так, будто их жизненная сила многократно умножилась. Сонный, тихий городок забурлил. Тихие кикандонцы превращаются в драчунов, ловеласов и дуэлянтов... Доходит до того, что Кикандон объявляет войну соседнему городу, с которым издревле жил в добрососедстве. Неизвестно, чем бы это кончилось, но газовый завод вдруг взорвался. Все мгновенно успокоились. Удивленные и снова затихшие кикандонцы смотрели друг на друга и не могли понять, что с ними было.

¹ Неудивительно, что Ж. Оффенбах сочинил на этот сюжет не менее веселую оперетту "Доктор Окс".

Доктор Окс и его помощник Иген просто провели в масштабе городка эксперимент, чтобы проверить, как обогащение воздуха кислородом действует на живые организмы.

Всякий, кому пришлось побывать в атмосфере, обогащенной кислородом, может подтвердить, что Ж. Верн очень точно показал, какое действие она производит.

О многочисленных применениях кислорода и азота, которые открыл XX в., речь еще впереди. Но в начале века были открыты и другие составные части воздуха – *инертные газы*. Тогда речь об их использовании и не возникала; нужно было сначала узнать их свойства и научиться извлекать их из воздуха отдельно от кислорода и азота. Эта задача оказалась достаточно сложной и без криогеники практически неразрешимой.

"Ленивые" инертные газы не только отказывались вступать в какие-либо химические реакции, но и долго сопротивлялись попыткам извлечь их из воздуха.

5.3. СЕМЕЙСТВО "ЛЕНИВЫХ" ГАЗОВ ВЫХОДИТ В СВЕТ

Открытие в воздухе инертных газов и исследование их уникальных свойств – заслуга английского физика У. Рамзая (1852–1916 гг.), который совместно с Дж. Рэлеем в 1894 г. открыл аргон, в 1895 г. обнаружил гелий на земле, а в 1898 г. совместно с М. Траверсом открыл криптон, ксенон и неон.

В 1904 г. за эти открытия и определение места инертных газов в таблице Менделеева он был награжден Нобелевской премией.

Отдавая должное заслугам Рамзая, не следует забывать, что первым обнаружил присутствие в воздухе примеси газов, не вступающих в химические реакции, другой великий физик – член Королевского общества Г. Кавендиш (1731–1810 гг.). Это открытие (как и многие другие) он не опубликовал, и оно стало известно из записей, найденных среди его бумаг намного позже.

Известно, что Кавендиш работал в своей лаборатории один, пользуясь только помощью слуги, выполнявшего по совместительству роль ассистента, не имея в своем распоряжении ни криогенной техники, ни спектрального анализа. И тем не менее он не только обнаружил инертные газы, но и определил их суммарное содержание в воздухе с погрешностью всего 9%.

Ранее, в 1772 г., он открыл азот и изучил некоторые его свойства, но результат не опубликовал; поэтому честь открытия была отдана Л. Резерфорду, который сделал это в том же году, но позже. Именно знание химических свойств азота (открытых им самим) дало Кавендишу возможность обнаружить инертные газы.

Пропуская через воздух, смешанный с кислородом, электрические разряды в присутствии воды, он установил, что при этом образуется азотная кислота. Поглощая ее едким кали КОН, он делал это до тех пор, пока объем газа не перестал уменьшаться (т.е. весь азот окислялся, а оксид был удален). Процесс химического связывания азота был длительным и очень трудоемким, особенно для слуги Кавендиша, который во все время опыта крутил ручную электростатическую машину. После этого Кавендиш удалил оставшийся кислород и установил, что объем несконденсировавшегося газа составляет около 1/120 первоначального объема. Это и были инертные газы (по современным данным их содержание 1/109!).

У. Рамзай уже через столетие не только вновь установил наличие в воздухе инертных газов, но и постепенно "вытащил" из смеси каждый по отдельности и изучил их свойства.

Дело началось с того, что он и Рэлей заметили, что азот, получаемый из воздуха, тяжелее, чем полученный химическим путем. Разница и объяснялась содержанием инертных газов.

Извлечение из воздуха каждого члена этого семейства и изучение их свойств было чрезвычайно трудной задачей прежде всего потому, что их процентное содержание (кроме аргона) ничтожно (табл. 5.1).

Какие эмоции у исследователей вызывала работа с этими, как их тогда называли "благородными" газами, показывают названия, которые дал им крестный отец – Рамзай. Имена все греческие и поэтому для людей, не знающих этого языка, звучат вполне благозвучно. Однако аргон – "ленивый", криптон – "скрытый" (от этого же корня зашифрованная запись – "криптограмма"), ксенон – "чуждый". Такая вот газовая семейка! Только два газа, принадлежащие к ней, неон – "новый" и гелий – "солнечный", получили приятные имена.

К. Линде, Ж. Клод и другие много работали над извлечением этих газов из воздуха. Подробное изложение связанных с этим интересных событий заняло бы слишком много места. Отметим только самое главное.

Таблица 5.1. Содержание в воздухе и нормальные температуры кипения инертных газов

Газ	Температура кипения, К	Концентрация (объемная доля), %
Аргон	87,3	0,934
Неон	23,6	$1,82 \cdot 10^{-3}$
Гелий	4,2	$5,24 \cdot 10^{-4}$
Криптон	119,7	$1,14 \cdot 10^{-4}$
Ксенон	165,0	$8,7 \cdot 10^{-6}$

Еще в начале века было обнаружено, что во многих месторождениях природного горючего газа, добываемого в США и Канаде, содержится значительное количество гелия (до нескольких процентов). В дальнейшем такие газы были обнаружены и в других странах, поэтому вопрос о получении гелия из воздуха, где его содержание ничтожно, отпал сразу. В конце первой мировой войны в США были построены фирмами "Линде" и "Лэр Ликид" первые заводы по извлечению гелия из природного газа. Все остальные – аргон, неон, криптон и ксенон добываются только из воздуха одновременно с кислородом и азотом.

Принципиальная основа этих процессов извлечения инертных газов становится ясной, если рассмотреть их поведение в колонне Линде двойной ректификации воздуха (рис. 5.14).

Поступая с охлажденным воздухом в нижнюю колонну совместно, они сразу же начинают вести себя по-разному – в соответствии со своими свойствами.

Гелий и неон при температурах, существующих в колонне, остаются в газообразном состоянии; их температура конденсации намного ниже, чем у жидких кислорода и азота. Растворимость их в этих жидкостях ничтожна.

Поэтому естественно, что гелий и неон вместе с парами поднимаются вверх по колонне и попадают в конденсатор. Здесь азот конденсируется и стекает вниз, а смесь неона и гелия остается газообразной и (хотя и медленно) накапливается под крышкой этого теплообменного аппарата. Отсюда ее можно (естественно, не в чистом виде, а в смеси с азотом) периоди-

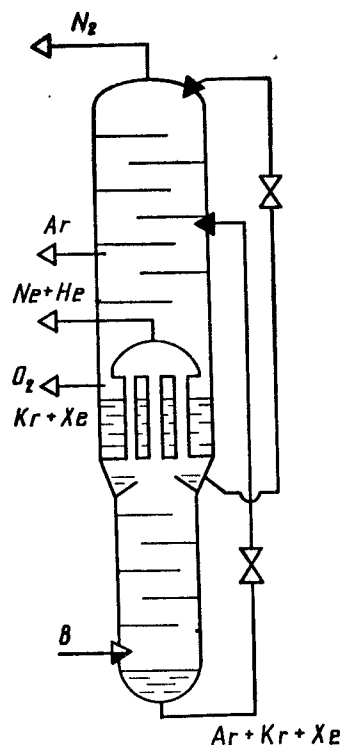


Рис. 5.14. Распределение инертных газов в колонне двойной ректификации

чески отбирать для дальнейшего разделения и очистки. Количество ее по отношению к кислороду и азоту очень мало: на 1000 м³ переработанного воздуха выделяется 18,2 л неона и 5,2 л гелия. Из этой смеси, в которой неона примерно в 3 раза больше, чем гелия, его и выделяют.

Криптон и ксенон (тяжелые инертные газы), в отличие от гелия и неона, сразу переходят в жидкое состояние и растворяются в охлаждаемом воздухе. Вместе с ним они попадают в испаритель нижней колонны, затем в верхнюю колонну и, на-

конец, собираются в жидком кислороде. Если из установки отбирается жидкий кислород, они уходят вместе с жидкостью, если газообразный, то с ним – другого пути нет. Содержание и криптона, и ксенона в кислороде в 5 раз больше, чем в воздухе (так как его получается в 5 раз меньше). Но и это количество ничтожно – в 1000 м³ кислорода содержится 5,7 л криптона и 4,3 см³ ксенона. Поэтому задачу извлечения Кг+Хе из кислорода можно было решать только на крупной промышленной установке, способной "переварить" большие количества кислорода, и постепенно, шаг за шагом, концентрировать эти "скрытый и чуждый" газы. Вместе с ними концентрировались в кислороде и другие, в том числе взрывчатые примеси воздуха (например, углеводороды), на которые сначала не обращали внимания – ведь содержание их было ничтожным. П. Рибо, сотрудник Ж. Клода, погиб при взрыве такой смеси, образовавшейся при опытах по концентрированию криптона и ксенона. Только в 20-е годы эту задачу удалось решить – криптон и ксенон

стали обычными техническими продуктами (хотя и относительно дорогими).

Что касается аргона, то его поведение в ректификационной колонне более сложно, чем остальных инертных газов. Поскольку гелий и неон – "легкокипящие", а криптон и ксенон – "тяжелокипящие", их положение в колонне четко определено: первые с паром идут вверх, вторые – с жидкостью вниз. Аргон же, как "среднекипящий", оказывается в трудном положении. Его температура кипения на 3 К ниже, чем у кислорода, но на 10 К выше, чем у азота.

В нижней колонне, где нет полного разделения, он присоединяется к смеси, содержащей больше кислорода, попадает в испаритель и подается с жидкостью в верхнюю колонну. Тут уже производится окончательное разделение: надо выбирать, куда идти – вверх с азотом или вниз с кислородом. Но аргон оказывается в трудном положении: сверху на него льется холодный азот, который его конденсирует и смывает вниз, а снизу его подогревает более теплый кислородный пар, стремящийся вверх. У "ленивого" аргона, если его не отводить из середины колонны, остается один способ уйти – часть его выходит с кислородом, а другая часть – с азотом. В установках, где получают только кислород и азот, так и происходит.

Такая ситуация и определяет способ извлечения аргона – его отводят из средней части верхней колонны, естественно, с неизбежными примесями кислорода и азота. Цель всей дальнейшей технологической цепочки сводится к получению чистого аргона путем удаления и кислорода, и азота.

И К. Линде, и Ж. Клоду, каждому в своем варианте, удалось разработать такие технологии. Удаление азота и части кислорода производилось ректификацией, а окончательная очистка от кислорода – химическим путем – взаимодействием с серой или с водородом.

В дальнейшем, уже в наше время, удалось достигнуть достаточно полной очистки аргона как ректификацией, так и адсорбцией.

Первые соображения об использовании инертных газов высказывались еще в начале века (например, для заполнения газосветных трубок и электрических ламп накаливания), но широкое их применение развилось уже позже, в наше время.

Таким образом, в классический период развития криогеники, закончившийся в начале XX в., были заложены основы как теории, так и криогенной техники.

На этом фундаменте выросли целые направления техники и технологии со своей научной базой, обеспечившие существенный вклад в современную научно-техническую революцию.

Параллельно с криогеникой бурно развивалась и холодильная техника. Она тоже вышла в первые годы XX в. с солидным научно-техническим заделом и производственным опытом. Более того, опередив криогенику в части практического использования своих возможностей, она раньше вышла на уровень возникновения и развития соответствующих новых технологий. При этом, естественно, продолжали совершенствоваться как сама холодильная техника, так и ее научная база.

Обе последующие главы книги и посвящены развитию холодильного и криогенного направлений низкотемпературной науки, техники и технологии в эпоху подготовки и начала современной научно-технической революции.

Глава шестая

ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА НАБИРАЕТ СИЛУ И ЗАВОЕВЫВАЕТ МИР

Пища — основа жизни человека.

И. Ильф, Е. Петров

*Развитое холодильное хозяйство
необходимо для существования
крупных городов и того,
что мы называем
современной цивилизацией.*

А. Бражников, Э. Каухчишвили

6.1. ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА СОВЕРШЕНСТВУЕТСЯ

В начале второй половины XIX в., когда холодильная техника находилась еще в начальной стадии развития, лишь очень немногие могли предвидеть, какое значение она будет иметь в будущем.

К числу таких людей принадлежал французский инженер Фердинанд Карре (1824–1900 гг.) — один из основоположников холодильной техники. В 1860 г. он впервые набросал широкую панораму ее приложений в народном хозяйстве.

Он назвал, прежде всего, производство льда, без которого в то время вообще трудно было представить использование холода, затем охлаждение помещений — жилых, производственных и общественных (то, что теперь называется кондиционированием). Ф. Карре даже рассчитал, что стоимость одной калории нужного для этого холода будет превышать стоимость калории тепла, идущего на отопление, примерно в 2 раза (что впоследствии оказалось близким к истине). Далее он перечис-



Рис. 6.1. Фердинанд Карре

лил ряд технологий: регулирование брожения в производстве вина и пива, концентрирование вин, спирта и кислот, получение пресной воды из морской путем вымораживания, экстракцию парафинов из нефти, получение глауберовой соли Na_2SO_4 из морской воды и т.д.

Можно только удивляться прозорливости Карре. Тем не менее он, естественно, не назвал и половины того, что может делать холод. Кроме того, он связывал почти все применения холода с использованием льда (природного и искусственного).

Однако потребности общества в широком применении холода быстро вышли далеко за пределы предсказаний Ф. Карре. Доля городского населения в развитых странах возрастала. Уходили в прошлое времена, когда большинство пищевых продуктов потреблялось непосредственно на месте их производства или вблизи него. Нужна была дальняя транспортировка мяса, рыбы, молочных продуктов, овощей и фруктов и их длительное хранение.

Холодильная техника начала второй половины XIX в. не могла еще обеспечить своих потенциальных потребителей соответствующим оборудованием. Но дело было не только в ней. К каждой холодильной установке нужен был привод. Это означало, что было необходимо приобретать, устанавливать и эксплуатировать соответствующую паровую машину. Почти до конца века ей альтернативы не было. Только на морских судах можно было использовать их собственные двигатели.

К концу века ситуация в корне изменилась – как в самой холодильной технике, так и в энергетике и машиностроении. В гл. 3 было рассказано о том, как стало производиться большое число компрессионных холодильных установок, которые заняли господствующее положение на рынке. Они обеспечили в основном удовлетворение всех нужд промышленности, транспорта и торговли в холоде.

Картина, однако, будет неполной, если не рассказать еще и о двух других типах холодильных установок, изобретенных и разработанных в те же годы. Это абсорбционные и парожеткотные установки. Они, как и пароконпрессионные, относятся к группе парожидкостных установок, но существенно отличаются от них тем, что работают без механического компрессора. Как в дальнейшем показала практика, они не могут вытеснить пароконпрессионные машины, но в ряде случаев имеют определенные преимущества.

Историю абсорбционного охлаждения нужно начинать, по-видимому, с 1777 г., когда Г. Нейрн обнаружил способность серной кислоты поглощать водяной пар. Это ее свойство было известно и раньше, но Нейрн заметил очень важное обстоятельство – процесс поглощения в отсутствие воздуха идет намного быстрее. Если поместить чашу с серной кислотой и сосуд с водой в вакуум (под колпак воздушного насоса), то поглощение пара, а следовательно, и испарение воды идут столь бурно, что вода в другой чаше может даже замерзнуть.

Оба явления – как охлаждение при испарении жидкости (испарительное охлаждение), так и поглощение одной жидкостью паров другой, сопровождаемое нагреванием (абсорбция)¹, были известны каждое отдельно. Заслуга Нейрна не только в установлении того, что воздух здесь "третий лишний" и мешает процессу, но и в том, что он соединил испарительное охлаждение с абсорбцией. Практическим приложением такого абсорбционного охлаждения Нейрн не занимался.

Профессор математики и физики в Эдинбурге Д. Лесли (1766–1832 гг.) на основе такого сочетания процессов построил в

¹ Термин "абсорбция" происходит от латинского слова *absorbere* – поглощение, всасывание. Противоположный процесс – выделение пара поглощенного вещества – абсорбата из абсорбента (поглотителя) при нагреве или вакуумировании – называется десорбцией.

1810 г. лабораторный холодильный аппарат. Аппарат состоял из двух соединенных трубкой стеклянных сосудов – одного с серной кислотой, другого с водой. Воздух из первого сосуда предварительно откачивался вакуумным насосом с ручным приводом. Если открыть вентиль на соединительной трубке, то "серная кислота, которая имеет огромную способность поглощать воду, забирает пары по мере того, как они образуются. Испарение идет быстро, в короткое время температура воды понижается, и она замерзает". Лед удаляют, производится откачка системы, и процесс повторяется.

Какие-либо достоверные данные о производительности установки Лесли отсутствуют. Есть упоминание о 3 кг (6 фунтах) льда в час; в других источниках говорится о 500–700 г за цикл. Если это так, то каждый цикл продолжался примерно 10 мин. Аппарат Лесли остался лишь лабораторным образцом и распространения не получил. Однако идея жила, и через 40 лет Эдмунд Карре – брат Ф. Карре, построил более совершенный сернокислотно-водяной абсорбционный холодильный аппарат. Конструктивное его оформление было уже приспособлено для практического использования (рис. 6.2). Сосуд для охлаждения воды (или льда) был стеклянным и мог легко сниматься; сосуд для серной кислоты был сделан из свинца – материала, устойчивого по отношению к ней. Откачка воздуха и водяного пара между циклами приготовления продукта производилась так же, как у Лесли – ручным насосом.

Этот аппарат выпускался серийно одной из английских фирм и нашел применение, в частности, в парижских кафе. Хозяин, который имел такой агрегат, мог предложить своим клиентам охлажденные напитки и мороженое в любое время года и был независим от поставок льда.

После 1850 г. в течение более четверти века проводились лишь отдельные работы по дальнейшему совершенствованию абсорбционного охлаждения. Они не дали каких-либо результатов в виде новых жизнеспособных конструкций, но два существенных достижения были все же получены. Во-первых, было найдено, что существуют и другие пары веществ – адсорбентов и адсорбатов, кроме H_2SO_4 и H_2O : вода H_2O и аммиак NH_3 , эфир (C_2H_5) $_2O$ и сернистый ангидрид SO_2 . Первая из этих пар стала в дальнейшем основной для абсорбционных холодильных установок.

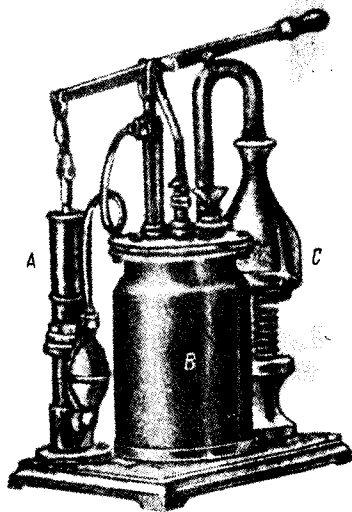


Рис. 6.2. Абсорбционная холодильная установка Э. Карре:

А — воздушный насос; В, С — сосуды для серной кислоты и охлаждения воды

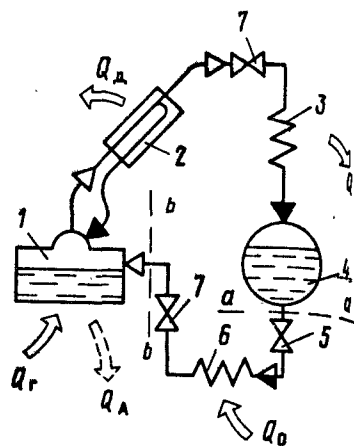


Рис. 6.3. Схема абсорбционной холодильной установки периодического действия.

1 — генератор-абсорбер; 2 — дефлегматор; 3 — конденсатор; 4 — ресивер; 5 — дренаж; 6 — испаритель; 7 — запорный вентиль

Во-вторых, было показано, что для удаления из абсорбента поглощенного пара (абсорбата) применение вакуумного насоса необязательно; его можно убрать, добившись удаления пара в результате нагревания. Температура при этом должна быть выше, чем та, которая соответствует кипению жидкости поглощенного абсорбата. Например, чтобы удалить водяной пар, поглощенный серной кислотой, нужно нагреть раствор до 180–200°C. Такое решение¹ сразу упростило задачу, поскольку отпала необходимость использовать наиболее неприятный в эксплуатации элемент установки — вакуумный насос.

Эта заслуга принадлежит Ф. Виндхаузену, который в 1878 г. показал на экспериментальных образцах десорбцию водяных

¹ Слово "решение" (в смысле "техническое решение") вместо термина "открытие" применено здесь потому, что выделение пара из абсорбента при нагревании наблюдал еще Фарадей в опытах 1823 г.

паров нагревом из смеси H_2SO_4 с водой. Он внес и много других частичных усовершенствований в схемы и конструкции холодильных машин, в частности показал возможности использования регенеративного теплообмена в абсорбционных холодильных установках. Ф. Виндхаузен занимался с увлечением и воздушными холодильными машинами, и даже был основным оппонентом К. Линде на Венском конгрессе пивоваров, отстаивая преимущества воздушных машин по сравнению с парокompрессионными.

Ф. Виндхаузен был талантливым инженером с широким кругозором и оригинальным умом, напоминая в этом отношении Перкинса.

В частным задачам он мог получать важные результаты; однако синтезировать их в качественно новую техническую систему он не смог.

Основная заслуга в создании абсорбционных холодильных установок, в главных чертах существенно не отличающихся от современных, принадлежит все же Фердинанду Карре, о котором уже упоминалось в начале главы. Он был, как и другие, самые выдающиеся его современники, многосторонним инженером-универсалом, знакомым с теплотехникой, металлургией и даже с нарождавшейся тогда электротехникой. В то же время он получил и хорошую научную подготовку, сочетавшуюся с производственным опытом. Таким образом, Карре соединял в себе все качества, необходимые для того, чтобы творчески подойти ко всему, что было накоплено до него, свести это воедино, смело исключить тупиковые идеи и начать новое направление холодильной техники.

Начал он с усовершенствования парокompрессионных установок, что дало, несомненно, толчок к созданию абсорбционных холодильных установок непрерывного действия, а не периодического, как было прежде.

В 1859 г. Ф. Карре получил основополагающий патент на водоаммиачную абсорбционную установку. Он безоговорочно (и как показала впоследствии практика — правильно) отказался от серной кислоты и всех других, ранее предлагавшихся абсорбентов. Опираясь на свойства смеси NH_3 и H_2O , он предусмотрел все возможные варианты ее использования. Не довольствуясь этим, Карре до 1862 г. получил еще 14 (!) патентов на различные усовершенствования общей схемы, а также конструкций аппаратов, машин, арматуры и приборов. В этом бло-

ке патентов содержалось, по существу, все, что определило развитие как водоаммиачных, так и других абсорбционных холодильных установок по крайней мере на полвека вперед.

Следует также отметить изобретенные им оребренные трубки для теплообменников, а также компрессоры и вентили с эластичными мембранами. Эти изобретения впоследствии вошли в арсенал не только всей низкотемпературной техники, но и химической технологии и энергетики.

В патентах Карре описаны два вида абсорбционных холодильных установок – периодического (о которых о то же не забыл) и непрерывного действия. В первых он шел по следам своего брата, модернизировав его модель на основе замены рабочих тел и вакуумной откачки – нагревом.

На рис. 6.3 показана (в современных обозначениях) принципиальная схема абсорбционной установки периодического действия. Сосуд 1 служит, в зависимости от периода цикла, либо генератором, либо абсорбером. В период зарядки находящийся в нем водоаммиачный раствор нагревается (с помощью водяного пара или каким-либо другим способом). При этом происходит десорбция – аммиак выделяется из воды. Затем пар аммиака проходит охлаждаемый дефлегматор (уже упоминавшееся в предыдущей главе устройство). В нем некоторое количество водяного пара, идущего совместно с аммиаком, конденсируется и сливается обратно в генератор. Пар аммиака поступает в конденсатор, где оживается. Отвод тепла и от дефлегматора, и от конденсатора ведется при температуре окружающей среды водой или воздухом. Жидкий аммиак сливается в теплоизолированный сосуд – ресивер. Когда почти весь аммиак перейдет в него и в генераторе останется только вода с небольшой примесью аммиака, процесс зарядки заканчивается.

Затем генератор начинают охлаждать водой или атмосферным воздухом. Давление в нем соответственно падает, и он превращается в абсорбер. Если теперь приоткрыть дроссельный вентиль, то жидкий аммиак (точно так же, как в парокомпрессионной установке) будет дросселироваться от давления p_k до низкого давления p_i и попадет в испаритель. Здесь под низким давлением, которое поддерживается абсорбером (поскольку охлажденная вода в нем поглощает пары аммиака), аммиак кипит, отводя тепло от того, что требуется охладить. Так разрядка продолжается до тех пор, пока весь аммиак из

ресивера не перейдет в абсорбер. Период разрядки продолжается обычно дольше, чем зарядки, и в течение всего этого времени участок системы от сечения $a-a$ до сечения $b-b$ работает точно так же, как и в парокомпрессионной установке.

При этом для обеспечения движения рабочего тела не нужно ни насоса, ни компрессора; все оборудование очень простое и потому надежное. Единственные элементы конструкции, которые должны иногда двигаться, – это вентили: запорные – нужно при изменении режима периодически открывать и закрывать, а дроссельный – регулировать.

Простота и надежность установок периодического действия обеспечивают им очевидные преимущества при малых производительностях, особенно тогда, когда непрерывная работа не требуется. Однако периодичность процесса связана с тем, что аппарат, нагретый в одной части цикла, надо охлаждать в другой, а затем снова нагревать. Это вызывает дополнительные расходы на нагрев и охлаждение.

Этот недостаток был исключен в абсорбционной установке непрерывного действия, создание которой стало основной заслугой Карре. Здесь повторилась та же последовательность развития, как в газовых и парожидкостных: от периодически действующих аппаратов, которые то нагревались, то охлаждались, к непрерывным. Ее схема представлена на рис. 6.4. При этом генератор и абсорбер – уже самостоятельные аппараты, каждый из которых занят исключительно своим собственным делом и работает в стационарном режиме¹.

В генераторе при подогреве аммиак выделяется из концентрированного ("крепкого") раствора, проходит дефлегматор, где освобождается от остатков водяного пара и подается при высоком давлении в конденсатор. Слабый раствор, состоящий из воды с остатками аммиака, идет через дроссель раствора в охлаждаемый при $T_{0,c}$ абсорбер. Сюда же поступает газообразный аммиак, прошедший, как и в парокомпрессионной установке, дроссель и испаритель. Слабый раствор поглощает аммиак, превращаясь в "крепкий", и насосом снова подается в генератор.

¹ Стационарный режим – такой, при котором все параметры потоков в каждой точке схемы неизменны по времени (в отличие от нестационарного, в частности периодического, где они переменны).

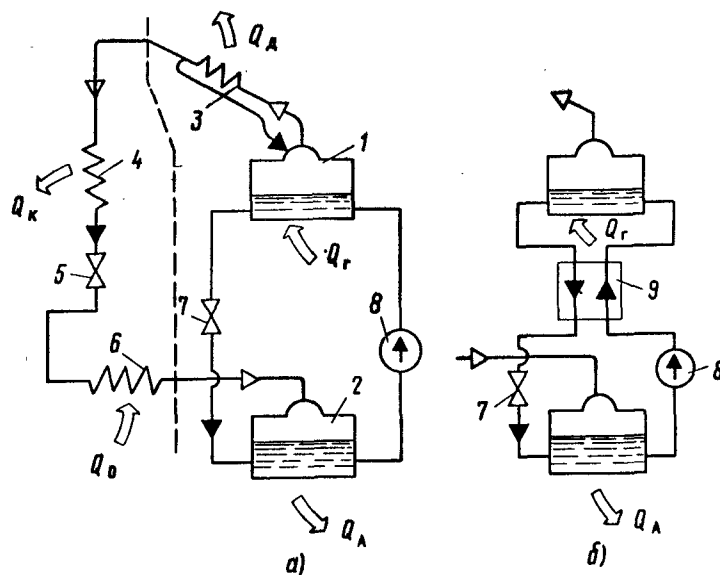


Рис. 6.4. Схема абсорбционной водоаммиачной холодильной установки непрерывного действия:

а — общая схема; б — схема включения регенеративного теплообменника раствора; 1 — генератор; 2 — абсорбер; 3 — дефлегматор; 4 — конденсатор; 5 — дроссель; 6 — испаритель; 7 — дроссель слабого раствора; 8 — насос крепкого раствора; 9 — регенеративный теплообменник

Очевидно, что часть установки, расположенная левее штриховой линии, представляет собой такое же сочетание аппаратов, как и в парокомпрессионной холодильной установке. Часть, расположенная правее нее, выполняет ту же роль, что компрессор в парокомпрессионной установке, т.е. повышает давление пара аммиака. Только делается это не механическим путем, а термохимическим. Высокое давление обеспечивается подводом тепла при высокой температуре в генераторе в результате выделения аммиака из крепкого раствора, а низкое — отводом тепла при температуре окружающей среды, когда аммиак поглощается и всасывается слабым раствором.

Таким образом, действие абсорбционной холодильной установки обеспечивается не затратой работы (если не считать привод насоса крепкого раствора, мощность которого относительно невелика), а подводом тепла. В ряде случаев, особен-

но когда имеется отбросное тепло низкого потенциала (150–200°C), это оказывается очень выгодным.

Ф. Карре изобрел и способ уменьшения расхода тепла путем введения его регенерации (реализовав идею Виндхаузена). На рис. 6.4, б показано, как это делается. Теплообменник устанавливается на потоках раствора между генератором и абсорбером. Горячий раствор, идущий из генератора в абсорбер, охлаждается в нем, а "крепкий", идущий в генератор, — нагревается. В результате в генератор поступает уже подогретый раствор, а в абсорбер — охлажденный. Таким путем уменьшается расход как тепла в генераторе, так и охлаждающей воды (или воздуха) в абсорбере.

Построенная Карре абсорбционная холодильная машина непрерывного действия демонстрировалась на Всемирной выставке 1862 г. в Лондоне. Она давала до 200 кг льда в сутки при температуре нагрева генератора 130°C. В том же году Парижская академия наук учредила авторитетную комиссию для оценки изобретения Карре. Комиссия констатировала, что "Карре с большим остроумием нашел новое, вдохновляющее и практически значительное решение проблемы получения искусственного холода".

Абсорбционная холодильная установка — первый успешный результат попыток вообще устранить самый дорогой и неприятный в эксплуатации элемент компрессионного цикла — компрессор.

Ее изобретатели, главный из которых был несомненно Карре, действовали в духе инженерного афоризма, высказанного почти веком позже известным конструктором танка Т-34 М. И. Кошкиным: "Лучшая деталь танка — деталь, которой нет".

Машины Карре распространились не только в Европе, но и в США. Известно, что во время гражданской войны они помогали осажденным южанам сохранять продукты питания в Новом Орлеане (1863 г.).

Сейчас найдены и другие пары веществ для абсорбционных установок, но смесь NH_3 и H_2O до сих пор не потеряла значения. Современные водоаммиачные установки в принципе не отличаются от тех, которые разработал Ф. Карре более века назад. Такая долговечность технического устройства в наш век быстрой смены поколений техники встречается чрезвычайно редко. В этом Ф. Карре превзошел даже К. Линде!

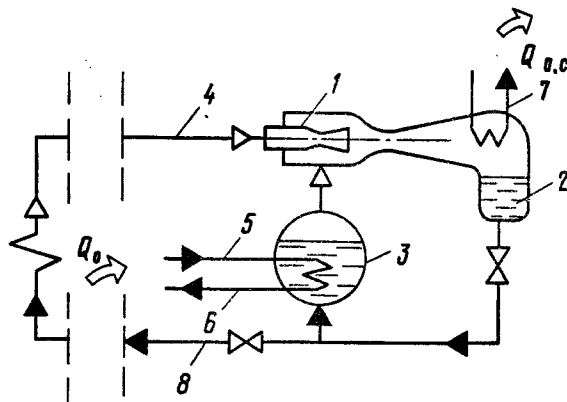


Рис. 6.5. Схема пароежекторной холодильной установки:

1 — сопло эжектора; 2 — конденсат; 3 — испаритель; 4 — рабочий пар; 5, 6 — вход и выход охлаждаемой воды; 7 — конденсатор; 8 — отвод воды в котел

Другой вид бескомпрессионных холодильных установок — пароежекторные, появился позже — в 1910 г. Они работали на самом древнем и доступном холодильном агенте — воде. Отсасывание водяного пара в испарителе и нагнетание его в конденсатор производилось в струйном насосе — эжекторе.

Схема пароежекторной установки показана на рис. 6.5. Здесь пар, выходящий с большой скоростью из сопла эжектора, увлекает за собой и сжимает пар низкого давления, отсасываемый из испарителя. Идея применять эжектор для сжатия рабочего тела холодильных установок появилась в патентной литературе еще в 1894 г., а реализована впервые была М. Лебланом в 1910 г. Работа эжектора обеспечивается большей частью водяным паром; поэтому эжекторные установки выгодны там, где имеется достаточное количество дешевого пара. При работе на воде они могут применяться там, где нужны температуры не ниже 3–4°C, например для кондиционирования воздуха.

Абсорбционные и эжекторные установки пополнили число видов холодильных установок, и "на старт" к концу века вышли четыре их вида — парокompрессионные, воздушные, абсорбционные и пароежекторные.

Все они "участвовали в соревновании" XX в.: "главным судьей" была экономика. Каждый вид установок совершенствовался на ходу и постоянно улучшал свои характеристики. Все

же первое место в подавляющем большинстве случаев занимали парокompрессионные установки; пока нет признаков, говорящих о том, что в ближайшей перспективе это положение изменится. Однако и для других находились "экологические ниши" — области, где они имели неоспоримые преимущества.

Абсорбционные установки имеют определенные области применения, из которых едва ли будут вытеснены в ближайшее время; они вне конкуренции там, где имеется избыток дешевого низкопотенциального тепла.

Воздушные холодильные установки, начиная с 40-х годов, находят все большее распространение. Это объясняется прежде всего тем, что были найдены принципиально новые технические решения, позволяющие эффективно переработать большое количество воздуха при низких давлениях. Для сжатия разработаны эффективные малогабаритные турбокомпрессоры, а для расширения — турбодетандеры; применяется и новая компактная теплообменная аппаратура. Кроме этого, появились и новые области их использования (например, в авиации для кондиционирования воздуха в салонах самолетов).

Пароежекторные установки, работающие на воде, после некоторого периода относительно широкого использования стали применяться редко из-за очень низкого КПД (не выше 3–4%). Они уступили место абсорбционным, работающим на смеси бромистого лития и воды. Однако при использовании других рабочих тел пароежекторные установки можно сделать существенно более эффективными.

Каждый вид холодильных установок в процессе длительного развития претерпел существенные изменения. Изменилось почти все — современная установка и по всем показателям, и даже по внешнему виду мало похожа на своего "дедушку" столетней давности.

Проследим эту эволюцию на двух примерах, относящихся к парокompрессионным установкам.

Первый из них относится к рабочим телам — хладагентам. Самый живучий из них (применяется более 100 лет) — это аммиак. Некоторые вещества сошли со сцены, появились новые, а он продолжает работать! И это несмотря на множество недостатков. Аммиак ядовит; небольшая его примесь в воздухе вызывает тяжелое отравление. Он в смеси с воздухом взрывоопасен. Наконец, он разъедает цветные металлы; поэтому применять их в аммиачных машинах нельзя. Любому другому

хладагенту такого букета недостатков бы не простили, а аммиак живет... Какими же достоинствами это окупается?

У аммиака есть положительные особенности, одна из которых просто уникальна.

Отвод тепла от объекта, как мы уже видели, обеспечивается кипением хладагента в испарителе. Чем больше его теплота парообразования, тем, естественно, меньше при прочих равных условиях его нужно и "гонять" в цикле. Так вот, теплота испарения аммиака в несколько раз больше, чем у любого другого хладагента (у аммиака при давлении 0,1 МПа $r = 1369$ кДж/кг, у метилового эфира $r = 464$ кДж/кг и у диоксида серы $r = 390$ кДж/кг). В этом отношении аммиак напоминает другую уникальную жидкость – воду, у которой при аналогичных условиях $r = 2497$ кДж/кг.

Аммиак также имеет очень удобную зависимость давления от температуры кипения (см. рис. 3.12): не слишком высокие давления конденсации при температурах окружающей среды $T_{0,c}$ и не очень низкие при наиболее часто требуемых температурах объекта охлаждения T_0 . Нельзя забывать и о том, что аммиак (в паре с водой) самый ходовой агент и в абсорбционных холодильных установках. Наконец, аммиак очень дешев и доступен – химики синтезируют его миллионами тонн.

При всех достоинствах аммиака поиски других рабочих тел, пригодных для самых различных условий работы, интенсивно продолжались. Некоторое время использовался в качестве рабочего тела и диоксид углерода. Привлекала его доступность и химическая инертность. Однако по своим термодинамическим свойствам он оказался не очень подходящим, так как требовались слишком высокие давления для конденсации при $T_{0,c}$. Однако углекислотные установки уцелели, пережив серьезную трансформацию: они превратились в системы для производства и выдачи на сторону "сухого льда" – твердого диоксида углерода. Как транспортируемый хладагент он очень удобен, так как обеспечивает температуры до -78°C и при атмосферном давлении сразу сублимируется – переходит в пар.

Известно, что впервые твердый диоксид углерода был получен еще Тилорье в 1834 г. в виде снега при дросселировании жидкости. Но тогда вопрос о его широком практическом применении не возникал. Первое известие о выходе "сухого льда" в торговлю "в железных, прочно закупоренных бутылках" было помещено в 1-м томе книги с пространством названием: "30.000 новейших открытий, рецептов, общепользовных практи-

ческих сведений и современных изысканий по части всех знаний, выработанных современными науками и искусствами", вышедшей в Москве в 1885 г.

Качественный скачок в создании новых хладагентов произошел в 1930 г., когда американская фирма "Дюпон" разработала целую серию новых веществ под общим названием "фреоны". Это были галоидопроизводные предельных углеводородов, синтезированные Ф. Свартсом в Женеве с 1893 по 1907 гг. и им же впервые исследованные.

Как известно, общая формула предельных углеводородов C_nH_{2n+2} (метан CH_4 , этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 и т.д.). Фреоны образуются, если заменить все или часть атомов водорода в них на фтор или хлор (или и тем и другим одновременно). Очевидно, что таким путем можно получить огромное число самых разных соединений, широко варьируя их физические свойства. Большая часть фреонов химически инертна. Фреоны быстро нашли применение в холодильной технике. У нас они выпускаются под названием "хладоны".

Сейчас практически все холодильные парокомпрессионные установки работают либо на одном, наиболее подходящем по температурам фреоне, либо на "долгожителе" – аммиаке. Фреоны нашли также широкое применение как растворители в разных отраслях промышленности, а также в быту. Количество производимых в мире фреонов измеряется миллионами тонн в год.

Однако в середине 80-х годов над производством и использованием фреонов неожиданно сгустились тучи и грянул гром. Оказалось, что многие из них виновны, наряду с другими промышленными выбросами, в разрушении озонового слоя атмосферы, защищающего все живое от губительного жесткого ультрафиолетового излучения солнца. Несколькими авторитетными решениями на международном уровне, выработанными экспертными комиссиями (в том числе и Международного института холода) предложено во всех странах сначала сократить, а затем и вовсе прекратить выпуск и использование ряда фреонов.

Многое об "озоновой дыре" и о влиянии на озоновый слой фреонов до сих пор неясно. Как это часто бывает в экологических вопросах, предположения, отдельные исследования и даже эмоции приводят к недостаточно обоснованным решениям. Предстоит выяснить, какие еще промышленные выбро-

сы в атмосферу влияют на озоновый слой, какова роль продуктов сгорания автомобильного, авиационного и ракетного топлива, а также природного метана и других газов (оказалось, что некоторые вулканы Камчатки в числе прочих газов синтезируют и извергают фреоны!). Нет оснований не считать, что многие "иностранцы" вулканы не хуже наших выделяют (и выделяли в прошлом) фреоны и другие, не менее опасные для озонового слоя газы. В 1982 г. фреоны были обнаружены даже в Антарктиде: их содержали пузырьки воздуха, вмороженные в антарктические ледники тысячелетия назад.

Все эти вопросы входят в самый сложный клубок неотложных задач экологии, решения которых время настоятельно требует. Что же касается холодильной техники, то работы по поиску экологически чистых хладагентов уже небезуспешно ведутся во всем мире, в том числе и у нас в стране.

В 50-х годах возникло и успешно развивается новое направление в поисках оптимальных холодильных агентов – создание смесей различных веществ с подходящими свойствами. Идея здесь очень проста и стара: ее лучше всего сформулировала Агафья Тихоновна в "Женитьбе" Н. В. Гоголя. "Если бы губы Никанора Ивановича да приставить бы к носу Ивана Кузьмича, да взять сколько-нибудь развязности, какая у Балтазара Балтазарыча, да прибавить к этому еще дородности Ивана Павловича..." Как ни странно, эту идею здесь удастся в значительной степени реализовать.

Первым из холодильщиков ее пытался использовать Р. Пикте в 70-х годах прошлого века, смешав диоксид серы SO_2 с диоксидом углерода CO_2 . Правда, эта смесь не оправдала возлагавшихся на нее надежд, но начало было положено. Вслед за Пикте было сделано еще несколько неудачных попыток, однако успех пришел значительно позже. Сейчас смеси хладагентов создаются уже не наугад, а на научной основе, и их применение во многих случаях дает существенный эффект. Иногда использование смесей сочетается и с изменением схемы установки. Это направление успешно развивается. Как правило, эффект от использования смесей больше сказывается с понижением температуры T_0 , поэтому они в последнее время более широко используются в криогенике.

Второй пример существенных изменений холодильных установок относится к компрессорам. В крупных установках совершился переход к турбокомпрессорам и осевым машинам

Таблица 5.1. Изменение некоторых параметров холодильного поршневого компрессора от установки с холодопроизводительностью 17,4 кВт (15 000 ккал/ч) в 1900–1970 гг.

Параметр	Годы					
	1900	1930	1939	1946	1956	1970
Масса, кг	1815	486	227	192	90	43
Объем, м ³	3,5	2,0	0,52	0,35	0,07	0,04
Частота вращения, мин ⁻¹	160	500	1500	1750	1750	3500

быстроходным и компактным. В малых и средних установках появились различные ротационные машины, более компактные и быстроходные. В итоге компрессор как таковой уцелел. Но за сто с лишним лет не изменился только его принцип действия. Что же касается конструкции, то поршневому компрессору под давлением все возрастающих требований и в борьбе с конкурентами пришлось сильно измениться: он стал почти неузнаваем, что видно из табл. 5.1.

Изменения потрясающие! Если бы конструкторам первых холодильных компрессоров сказали, что масса их машин может быть уменьшена (при сохранении производительности и снижении расхода энергии) в 40 (!) раз, они едва ли поверили в такую возможность. Этот процесс улучшения качественных показателей пока не только не прекращается, но даже существенно не замедляется. Большинство видов парокомпрессионных и воздушных холодильных установок находятся все еще на восходящей ветви s -кривой и до сатурации еще далеко (хотя поисковые работы в качественно новых направлениях уже ведутся).

Существенную, даже революционную роль в совершенствовании холодильных установок сыграл и переход от парового привода к электрическому. Но для очень крупных холодильных установок оказалось выгодным использовать для привода паровые турбины, питающиеся паром от электростанций.

Однако в большинстве холодильных установок используется электропривод. Он не только упростил их эксплуатацию и уменьшил затраты топлива на получение холода. Электропривод дал возможность дробления, индивидуализации холодиль-

ных установок, приближения их к объектам охлаждения. Это, в частности, привело к тому, что лед перестал быть средством транспортировки холода к индивидуальным потребителям. Каждый из них, используя свою холодильную установку, может иметь свой холод, а если нужно, то и лед.

Завершение этой тенденции привело к возникновению и бурному развитию в конце 20-х годов новой отрасли холодильной техники – производству небольших торговых и домашних холодильников. Потребовались, естественно, новые инженерные решения. Нужно было обеспечить высокую надежность, экономичность, бесшумность, автоматическое регулирование, удобство и безопасность эксплуатации и, наконец, эстетические требования. Возможность иметь "холод на дому" произвела переворот в способах переработки, транспортировки и хранения пищевых продуктов и привела к необходимости пересмотра всей идеологии этой области хозяйства.

6.2. "ХОЛОДИЛЬНАЯ ЦЕПЬ" – ОТ ПОЛЯ ДО ДОМА

Тезис о том, что "пища – основа жизни человека", подтвержденный в свое время Ильфом и Петровым в "Золотом теленке", обычно не вызывает каких-либо серьезных возражений даже у людей, справедливо ставящих на первое место духовную сторону жизни. Что же означает на практике обеспечение этой "основы жизни" в условиях нашего XX в. и тем более в перспективе?

Проблема связана с хранением и транспортировкой пищевых продуктов. Без ее разрешения накормить человечество с конца XIX в. и тем более в дальнейшем в принципе невозможно, независимо от масштабов сельскохозяйственного производства. Даже в том случае, если всех необходимых видов продуктов питания будет произведено вполне достаточно, и даже с избытком, потребитель получить их не сможет.

Задача хранения и транспортировки продуктов питания в большом масштабе возникла, как уже упоминалось выше, во второй половине XIX в. и встала во весь рост в XX в. Она становится и дальше тем сложнее, чем выше концентрация населения, а особенно в больших городах¹, чем больше развивается

¹ По прогнозам, число городов с населением более 1 млн к 2000 г. превысит 400.

специализация сельского хозяйства, крупномасштабное рыболовство, торговля продуктами питания. Сложилась обстановка, когда момент создания продукта может быть отделен от момента его потребления не только днями, но и месяцами, а место, где он создан, – сотнями и тысячами километров от места, где он потребляется. Все традиционные, выработанные веками способы долговременного хранения (сушка, копчение, засолка, консервирование всех видов, химическая обработка) ни в отдельности, ни все вместе решить эту задачу не могут, прежде всего потому, что продукт перестает быть натуральным, теряет многие питательные и вкусовые свойства. Да и после обработки срок хранения в обычных условиях достаточно ограничен. Это относится к продуктам как животного, так и растительного происхождения.

Вот что писал по этому поводу в начале 20-х годов известный советский специалист-холодильщик проф. В. Е. Пыдзик: "Нужен такой способ воздействия на продукты, который бы не изменял их свойства, как классические методы, а напротив, позволил бы сохранить их в свежем виде или максимально близком к нему на необходимый достаточно длительный срок..." Это означает, что нужно остановить (или очень сильно замедлить) все процессы, меняющие качество продукта. "Остановить мгновение" – задача в принципе не разрешимая. Но "растянуть" время, причем очень сильно – можно. Сделать это может только холод. Выходит, что не случайно в тех случаях, когда нужно что либо остановить и поддерживать на некотором неизменном уровне (переговоры, цены и т.п.), говорят "заморозить".

Разумеется, классические методы обработки пищевых продуктов холодильная обработка не заменяет. Напротив, как мы увидим далее, она может помогать приготовлению многих гастрономических изделий.

Итак, холодильная обработка – это обработка холодом. Она может проводиться по-разному в зависимости от того, предназначена ли она для сохранения качества продукта на длительный срок или входит как составной элемент в технологию его переработки.

В каждом из этих двух вариантов применяются свои технологии. В первом – их две; во втором – огромное множество.

Итак, о первом – хранении. Здесь технологии различаются по температурному уровню используемого охлаждения. Границей между ними служит так называемая криоскопическая температура.

тура. Она определяется тем, что жидкие компоненты продукта, состоящие в основном из воды, при охлаждении раньше или позже начинают кристаллизоваться. Это происходит при температурах ниже 0°C (в отличие от чистой воды). Процесс понижения температуры продукта до уровня, лежащего выше криоскопической температуры, называют *охлаждением*, а ниже – *замораживанием*.

Охлаждение существенно замедляет неблагоприятные изменения в продукте, особенно в том случае, если оно проведено сразу после его получения. Кроме этого, важно, чтобы продукт поступал на хранение неповрежденным: специалисты говорят, что холодильник – “гостиница, а не больница для продуктов”. Однако охлаждение не прекращает полностью неблагоприятные процессы, происходящие в продукте, в частности жизнедеятельность бактерий. Поэтому охлаждение применяется для относительно коротких сроков хранения (1–8 нед, а для некоторых продуктов – таких, как корнеплоды, капуста, яблоки зимних сортов, – до 6 мес и более). Для каждого вида охлажденных продуктов существуют свои оптимальные температурные режимы хранения; это целая наука, в которую мы углубляться здесь не можем. Иногда холодильное хранение сочетается с использованием инертной газовой среды, содержащей повышенное количество азота, диоксида углерода и др.

Замораживание приводит к полному (или почти полному) превращению влаги в лед и прекращению деятельности микроорганизмов. Замораживание и последующее хранение в замороженном состоянии гарантируют полную сохранность пищевых продуктов на длительный срок. О том, насколько этот срок может затянуться, свидетельствуют многие случаи нахождения продовольственных складов полярных экспедиций полувековой или вековой давности с прекрасно сохранившимися продуктами. Да и сама природа поставила множество блестящих экспериментов со “свежезамороженными” мамонтами, неоднократно обнаруженными в Сибири, мясо которых в течение тысячелетий прекрасно сохранилось.

Замораживание, как и охлаждение, дает максимальный эффект при соблюдении определенной технологии – как в первой стадии – при понижении температуры, так и в последней – при оттаивании – “размораживании”. Ее нарушения могут привести к ухудшению продукта, потере его вкусовых качеств и

привлекательного вида. Важное значение имеет скорость замораживания – чем она выше, тем меньше при кристаллизации влаги получаются кристаллы льда и соответственно меньше повреждается структура продукта. Отсюда возникла технология быстрого замораживания. Не менее, а может быть, и более интересна новая технология быстрого размораживания под вакуумом или прогревом СВЧ-энергией (токами сверхвысокой частоты).

При всем этом нужно также иметь в виду и экономическую сторону дела: чем ниже температура замораживания, тем дороже холод (сложнее оборудование, больше расход энергии). В связи с этим проф. Н. А. Головкиным был разработан компромиссный способ – поверхностные слои продукта замораживаются, а центральные – лишь охлаждаются. Получается “подмороженный” продукт, долго сохраняющий высокое качество, получение которого требует меньших расходов.

Все описанные методы дают возможность организовать единую “холодильную цепь” – от производителя продуктов до их потребителя. “Звенья” ее не только отличаются одно от другого по устройству, но имеют и разную протяженность; некоторые из них могут быть длиной в тысячи и даже десятки тысяч километров. Тем не менее они прочно связаны общим назначением и расположены в строгой последовательности.

На рис. 6.6 показана принципиальная схема “холодильной цепи”. Начальное ее звено – производственно-заготовительный холодильник, принадлежащий либо изготовителю продукта, либо другой, более общей организационной структуре. Здесь производится предварительная обработка продукта и его охлаждение, а если нужно, и замораживание. Работа такого холодильника чаще всего носит сезонный характер. Примером может служить холодильник крупной фермы, сельскохозяйственного кооператива, рыболовного траулера и т.п.

Следующее звено – базисный холодильник, – более крупный, служащий для накопления продукции, доставленной с заготовительных холодильников. Здесь, как и дальше, связь между звеньями цепи осуществляется специальным холодильным транспортом – автомобильным, морским (речным), железнодорожным или воздушным, оборудованным соответствующими холодильными установками. В случае необходимости перегрузки с одного вида транспорта на другой создаются перевалочные холодильники, приспособленные для краткосрочного хранения.

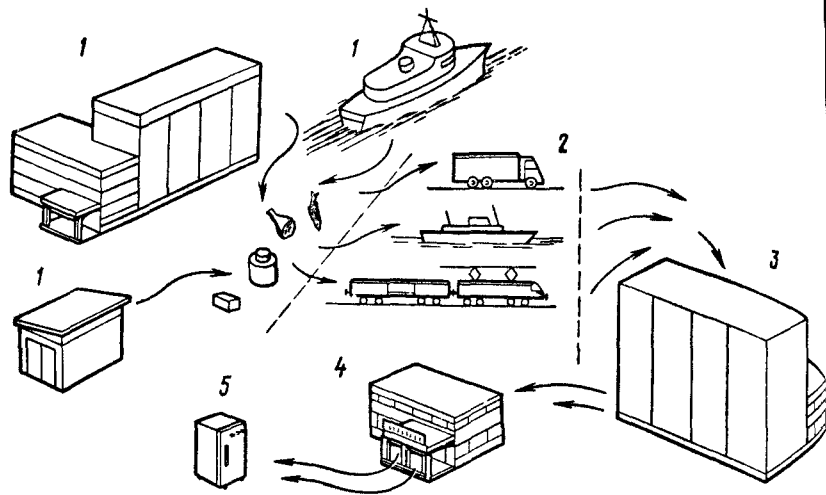


Рис. 6.6. Схема "холодильной цепи":

1 – производственно-заготовительный холодильник; 2 – базисный холодильник; 3 – распределительный холодильник; 4 – торговый холодильник; 5 – домашний холодильник

Дальше идет самое "толстое", центральное звено всей цепи – распределительные холодильники. Они предназначены для длительного хранения большого количества продукции и планомерного снабжения ими крупных городов или районов через розничную торговлю. Для этого в магазинах и на предприятиях общественного питания имеются торговые холодильники – предпоследнее звено или последнее. Наконец, "холодильная цепь" заканчивается домашним (бытовым) холодильником, откуда пищевые продукты поступают на семейный стол.

Все звенья "холодильной цепи", кроме последнего, обслуживаются многочисленными холодильными установками промышленного типа, об истории которых мы уже говорили.

Конечно, в своем окончательном виде "холодильная цепь" сложилась не сразу. Наибольшие трудности вызывал холодильный транспорт и последнее звено – домашний (или, как его иногда называют, – бытовой) холодильник.

Холодильный транспорт, как мы уже видели, зародился в "ледяном (или льдосоляном) варианте" еще в древности и

просуществовал до середины XX в. Однако очевидные его недостатки (необходимость в запасах льда, который нужно возить с собой, образование больших количеств жидкого рассола, сложность обслуживания) неизбежно вели к замене его машинным охлаждением¹. Первыми сделали попытки применить холодильные установки судовладельцы. На судах существовал паровой двигатель, который можно было использовать. Кроме этого, суда могли перевозить большое количество груза и на большие расстояния. Но при этом возникло много трудностей самого разного характера. От первых неудач пострадали, как почти всегда и бывает, первопроходцы – пионеры холодильного транспорта. Первым из них был, по-видимому, Гаррисон, уже упоминавшийся нами ранее, который предпринял в 1873 г. неудачную операцию по доставке дешевого мороженого мяса из Австралии в Лондон.

В России приоритет в использовании холодильных установок на транспорте принадлежит, по-видимому, астраханскому рыбопромышленнику Г. Л. Супуку. В 1888 г. он построил специальную баржу, которую теперь бы назвали рефрижераторной, грузоподъемностью примерно 160 т (1000 пудов). Это было первое судно, предназначенное не только для перевозки замороженного груза, но и его замораживания, с очень хорошо продуманной конструкцией.

Воздушные холодильные машины системы Лайтфут [одна с мощностью привода 25 (18,4 кВт) и другая 10 л.с. (7,4 кВт)] были установлены в носовом и кормовом отсеках. Паровая машина, приводившая их в движение, размещалась на палубе. Холодильные камеры были изолированы двойными стенками, между которыми насыпалась тепловая изоляция (угольная мелочь и опилки). Холодный воздух транспортировался в камеры по деревянным трубам. Каждая машина обслуживала свою половину баржи, но была предусмотрена возможность переключения и на другую. Холодный воздух после машины сначала поступал на сепаратор, где отделялся снег, образовавшийся в

¹ Единственный вид холодильного транспорта, безупречно работавшего долгие годы без всяких машин, был основан на непосредственном использовании зимних морозов в Сибири и на Севере европейской части России. Замороженные сливочное масло, мясо, рыба и другие продукты доставлялись конными обозами потребителям в идеальном состоянии.

машине из водяного пара, содержавшегося в воздухе, а затем в морозильное помещение. В каждом из них можно было разместить на решетчатых полках до 4 т свежей рыбы. При обработке холодным воздухом с температурой $-15 \div -25^\circ\text{C}$ рыба промораживалась меньше чем за 1 сут (самая крупная – за 1,5 сут). Отсюда воздух поступал в камеры хранения, где температура была выше ($-3 \div -5^\circ\text{C}$).

В августе 1888 г. прошли испытания, и баржа стала использоваться для доставки рыбы из Астрахани в Нижний Новгород.

Однако в дальнейшем выяснилось, что при относительно длительном хранении происходила усушка рыбы (до 15% за 2–5 мес) и соответствующее снижение ее качества. Объяснялось это тем, что холодный воздух был сухим (напомним, что влага из него вымерзала в виде снега, который отделялся) и подавался прямо на незапакованную рыбу.

Характерно, что причиной неудачи была не холодильная установка, которая прекрасно работала, а недоработка технологии обработки рыбы (которую, кстати, легко было бы устранить путем упаковки рыбы в блоки). Однако решение не было найдено, и Супук разорился.

Эти первые неудачи не остановили, разумеется, использование холодильных установок для транспортировки пищевых продуктов. Были разработаны как надежные холодильные установки, предназначенные для разных видов транспорта (морского и речного, железнодорожного, автомобильного и воздушного), так и технологии охлаждения, замораживания и хранения, соответствующие особенностям каждого продукта.

"Холодильная цепь", скрепленная теми или иными звеньями транспорта, приводит в конце концов продукт к потребителю – либо в холодильные предприятия общественного питания, либо в домашний холодильник.

Замыкающий цепь домашний холодильник – устройство во многом специфическое. Первые его образцы появились после окончания первой мировой войны, а серийный выпуск начался в 1920 г. Однако массовое распространение домашние холодильники получили начиная с 30-х годов сначала в США, потом и в других странах.

Такой существенный сдвиг по времени по сравнению с промышленными холодильными установками объясняется тем, что требования к домашнему холодильнику намного жестче. Ведь в нем сочетаются и двигатель с холодильным агрегатом,

и изолированное помещение для охлаждения, замораживания и хранения продуктов. Он должен быть автоматизирован, не нуждаться в постоянном обслуживании, иметь надежную тепловую изоляцию, не создавать шума и вибрации и, наконец, соответствовать требованиям эстетики. Ко всему прочему он должен быть и "болваностойчивым"¹ – не выходить из строя при любых ошибках хозяйки (или хозяина), связанных с неумением обращаться с техникой. Первые домашние холодильники не могли полностью соответствовать этим требованиям. Только с появлением агрегатов, в которых компрессор вместе с двигателем заключен в герметичный кожух, задача была решена. Интересно, что идею герметичного агрегата предложил еще в 1905 г. человек, специальность которого очень далека от холодильной техники, – французский католический аббат Одифрен.

Был и другой очень соблазнительный вариант – сделать абсорбционные холодильники. Ведь в этом случае можно было бы обойтись вообще без компрессора и двигателя, а просто подогревать генератор электрическим током (или газовой горелкой). Однако эту прекрасную идею губила необходимость в насосе крепкого раствора – он хотя и проще и меньше компрессора, но все же машина с приводом.

Изобретатели давно мечтали создать безнасосную абсорбционную холодильную установку непрерывного действия. Еще в 1899 г. Г. Гепперт придумал очень остроумный принцип, позволяющий осуществить эту мечту. Он предложил включить в цикл кроме абсорбента и абсорбата третье вещество – нейтральный газ, который позволял бы иметь во всем цикле одинаковое общее давление, а расширение рабочего тела осуществлять изменением парциальных давлений компонентов смеси. Однако Гепперт не мог найти подходящий нейтральный газ. Предложенный им для этой цели воздух плохо диффундировал в аммиак (а это должно было происходить, как мы увидим, быстро). Только через четверть века, в 1925 г., Б. фон Платен и К. Мунтерс, предложившие для этой цели водород, создали такую холодильную установку на смеси NH_3 , H_2O и H_2 ; она оказалась очень удобной и надежной. Появились и домашние

¹ Существует даже соответствующий международный термин на английском языке foolproof (fool – дурак, proof – устойчивый).

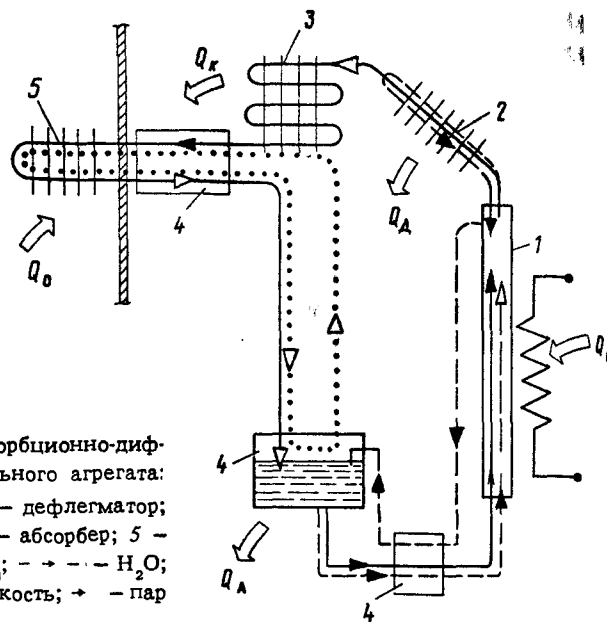


Рис. 6.7. Схема абсорбционно-диффузионного холодильного агрегата:

1 – генератор; 2 – дефлегматор; 3 – конденсатор; 4 – абсорбер; 5 – испаритель; → NH_3 ; - - - H_2O ; ····· – H_2 ; × – жидкость; + – пар

холодильники с такой абсорбционно-диффузионной установкой и электронагревом генератора (типа "Север" и "Морозко"). Единственный (но существенный) недостаток таких холодильников – пока примерно вдвое больший расход электроэнергии по сравнению с компрессионными.

Схема абсорбционно-диффузионного холодильного агрегата представлена на рис. 6.7. Отметим, что в этом агрегате, в отличие от классической абсорбционной установки непрерывного действия (см. рис. 6.4), устанавливаются не два давления (высокое – в генераторе, дефлегматоре и конденсаторе и низкое – в абсорбере и испарителе), а одно и то же во всех аппаратах – около 1,6 МПа (16 ат). Меняются только парциальные давления¹ отдельных компонентов – H_2O , NH_3 и H_2 .

¹ Парциальным называется то давление, которое имел бы данный компонент смеси, занимающий тот же объем при тех же условиях, но в отсутствие остальных компонентов. По закону Дальтона общее давление смеси газов равно сумме парциальных давлений компонентов. Парциальные давления пропорциональны долям данного компонента. Если, например, в смеси 10% водяного пара, 70% водорода и 20% аммиака, а общее давление 1,6 МПа, то парциальное давление водяного пара будет $1,6 \cdot 0,1 = 0,16$ МПа, водорода $1,6 \cdot 0,7 = 0,112$ МПа и аммиака $1,6 \cdot 0,2 = 0,32$ МПа.

В генераторе посредством электрического или газового нагрева кипятится крепкий раствор аммиака. Пар, содержащий некоторое количество воды, поступает в дефлегматор, где вследствие охлаждения наружным воздухом пары аммиака оседают от воды и направляются в конденсатор, в котором переходят в жидкость. Тепло от конденсатора тоже отводится наружным воздухом. Далее жидкий аммиак сливается в теплообменник, где дополнительно охлаждается возвращаемым из испарителя холодным парообразным аммиаком. Таким образом, в этой части все процессы идут так же, как в обычной абсорбционной установке. Но дальше начинает работать идея Гепперта – происходит дросселирование аммиака, но без дросселя. Аммиак попадает в атмосферу находящегося в испарителе водорода, и его давление понижается до 0,4 МПа (4 ат) – остальные 1,2 МПа (12 ат) приходится на водород. Поэтому аммиак исправно кипит, отводя тепло из холодильника. При этом он ведет себя в соответствии с законом Дальтона так, будто водорода вообще здесь нет. Далее смесь парообразного аммиака и водорода отводится через регенеративный теплообменник к абсорберу, охлаждаемому наружным воздухом.

Одновременно в абсорбер поступает из генератора слабый раствор, поглощающий аммиак, и полученный крепкий раствор возвращается в генератор. Водород туда попасть не может – ему мешает гидравлический затвор в абсорбере, образованный раствором; поэтому водороду ничего другого не остается, как возвратиться в испаритель и снова разбавлять аммиак, снижая его парциальное давление.

Все аппараты абсорбционно-диффузионного агрегата находятся вне холодильной камеры; внутрь помещен только испаритель.

Возникает вопрос: почему, хотя общее давление внутри системы одинаковое, ее содержимое исправно циркулирует по описанному маршруту? Это объясняется очень просто: жидкий раствор в абсорбере и трубопроводах тяжелее, чем парогазовая смесь в генераторе, состоящая из жидкости и пузырьков пара. Поэтому она по мере испарения все время втекает в генератор. Этот принцип естественной циркуляции ("термосифон") широко используется в испарительных установках.

Современные домашние холодильники, как компрессионные, так и абсорбционные, обычно имеют две (а некоторые

модели и три) камеры, одна из которых холодильная, а другая (или другие) – морозильные. В зависимости от температуры в морозильнике холодильники маркируются звездочками (символическими снежинками):

	t, °C
* (одна звездочка)	-6
** (две звездочки)	-12
*** (три звездочки)	-18
**** (четыре звездочки)	-24

Здесь так же, как у коньяка, – чем больше звездочек, тем качество выше!

Морозильная камера позволяет в домашних условиях не только месяцами хранить готовые замороженные продукты, но и производить в случае необходимости замораживание самых разнообразных продуктов – от фруктов до теста.

Таким образом, домашний холодильник – универсальный агрегат, который постоянно совершенствуется на базе последних достижений холодильной техники. Это относится и к самому холодильному агрегату, и к тепловой изоляции, автоматике. Появляются холодильники с программируемым температурным режимом и даже такие, которые приятным женским (или по желанию потребителя мужским) голосом указывают хозяйке (хозяину) на его неверные или ошибочные действия при обращении с холодильником и дают советы, как поступить в том или ином случае. В перспективе можно ожидать и такое высказывание холодильника: "Что же ты, бабуся, кладешь в меня валокордин и кардиамин – ведь это лекарства с эфирными маслами. Они от холода теряют свои свойства. Лучше положи в меня кекс и пирог, оставшийся от праздника, – они будут свежими и к следующему". Так или иначе, в обозримой перспективе именно домашним холодильником, независимо от того, каким станет его искусственный интеллект, будет замыкаться "холодильная цепь".

В заключение нужно отметить, что уже современные возможности холодильного хранения и транспорта позволяют в любое время года, в любом месте земного шара иметь круглый год в нужном количестве свежим любой вид продовольственных товаров – мясо, рыбу, молочные продукты, овощи и фрукты.

Из сказанного можно сделать вывод, что холодильная техника позволяет свести к нулю (или к минимуму) потери пище-

вых продуктов на пути от производителя к потребителю. Увы, это далеко не так. Возможность и действительность здесь (как и во многих других случаях) далеко не совпадают. В мире теряется в связи с этим, по данным Международного института холода, около миллиарда тонн продовольствия в год. Это составляет в среднем 20% общего количества вырабатываемых сельскохозяйственных продуктов. К сожалению, наша страна занимает по части таких потерь далеко не последнее место.

Вопрос о том, в какой степени в каждом случае дело связано с недостаточным количеством холодильной техники, относительно малой вместимостью холодильников в цепи или организационными, экономическими и другими факторами, выходит за пределы нашей книги. Очевидно лишь одно: стоимость потерь продуктов для общества намного превышает те затраты, которые необходимы для создания и эксплуатации "холодильной цепи". Более того, по мере совершенствования холодильной техники и технологии эти затраты (в частности, на энергию и материалы) могут быть существенно снижены.

6.3. ЧТО ЕЩЕ МОЖЕТ СДЕЛАТЬ ПОЛЕЗНОГО ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА

При всей жизненной важности для человечества "холодильной цепи" она далеко не исчерпывает всех возможностей, которые дает (и может дать в дальнейшем) холод в самых различных его приложениях.

Если описывать более или менее подробно все существующие и предлагаемые направления полезного использования холода, понадобилось бы несколько толстых томов. Поэтому мы сделаем иначе: дадим перечисление направлений и технологий, связанных с применением холодильных установок, снабдив их лишь краткими комментариями. Что же касается использования природного холода, и в частности водяного льда, то – этому посвящен § 6.4.

Начнем с применения холода в пищевых технологиях. При этом прежде всего нужно упомянуть традиционные области применения холода, и главную из них область пивоваренного производства, ведущие деятели которого – баварские пивовары так хорошо поддержали в свое время работы К. Линде.

Для пивоваров, в отличие от виноделов, охлаждение особенно важно: ведь пивное сусло получают из исходных продук-

тов в результате варки, поэтому его нужно охладить от более высокой температуры, чем вино. Да и само брожение пива происходит при температуре от 5 до 1°С (вина — при 15–12°С). Кроме этого, хранение пива требует тоже более низкой температуры, чем хранение вина.

Наконец, нельзя не упомянуть о том, что и пиво, и многие сорта вин (например, шампанское) необходимо подавать к столу охлажденными. Вспомним А. С. Пушкина:

Вдовы Клико или Мозта
Благословенное вино
В бутылке мерзлой для поэта
На стол тотчас принесено.

Кроме пивоварения, виноделия и охлаждения напитков уже в начале XX в. появилось много и других приложений холода. Об этом много писали в журналах и газетах, поскольку общественный интерес к холодильным (как тогда говорили "фригорифическим") делам был достаточно большим. Приведем лишь один пример. Вот что писал в 1911 г. инж. В. Агафонов на страницах русской популярной газеты "Речь": "За последние 5–10 лет фригорифические машины нашли самое неожиданное применение. Вы встретите их и в шоколадном производстве, где холод применяется при процессе вынимания шоколада из форм, и на новейших фабриках искусственного шелка, и на стеариновых, маргариновых и каучуковых заводах, и на фабриках красок, духов, клея, бензола, вообще во многих производствах химических и фармацевтических продуктов, где холод фригорифической машины заменяет теперь прежнее охлаждение естественным льдом.

За самое последнее время потребовались обширные фригорифические установки, как на суше — в артиллерийских складах, так и на военных судах — для сохранения бездымного пороха, в состав которого входит нитроклетчатка; благодаря самопроизвольным взрывам этого пороха, унесено много человеческих жизней и погибло несколько военных кораблей. Сохранение же этого пороха при определенной температуре, регулируемой фригорифической машиной, предупреждает эти самопроизвольные взрывы".

В последнее время список приложений холода почти полностью сохранился и значительно расширился. Многие производства вообще не могли бы существовать без широкого использования холодильной техники.

Все большее применение находит холодильная техника и в других, кроме существовавших в начале нашего века отраслях пищевой промышленности, благодаря тому, что охлажденные сырье и полуфабрикаты легче подвергаются обработке (резанию, дроблению, формованию), чем имеющие комнатную температуру. Охлаждение помогает также экстракции сока из фруктов и овощей. Если одновременно с давлением подвергать их действию низкой температуры, то количество полученного сока увеличивается примерно на 10%, а содержание в нем полезных аминокислот и витаминов возрастает. Это объясняется тем, что холод разрушает структуру клеток, их мембраны и ядра.

При этом проявляется своеобразная "холодильная диалектика". При охлаждении и замораживании пищевых продуктов для хранения и транспортировки процесс ведут так, чтобы минимально нарушать структуру продукта; при экстракции, напротив, режим охлаждения должен быть максимально разрушающим.

Особое место занимает в пищевых технологиях и "сухой лед" — твердый диоксид углерода. Он не только поддерживает низкую температуру, но и увеличение содержания CO_2 в газовой среде, окружающей многие продукты, способствует более длительному их хранению.

Он же идет для охлаждения, замораживания, транспортировки и хранения пищевых продуктов (в особенности мороженого), газификации питьевой воды, минеральных вод, напитков, шампанского, фруктовых соков и даже для тушения пожаров.

Самые неожиданные результаты могут дать научные знания, если их используют жулики. Сразу после начала бегов на ипподроме города Богота (Колумбия) Литта — один из самых урядных лошадей — взяла бешеный темп и пришла к финишу первой. Допинговый контроль ничего не дал. Истина проявилась позже: группа дельцов, сговорившись с жокеем, подложила под седло кусочек сухого льда, который, причиняя лошади боль, заставлял ее скакать на пределе сил. К финишу лед испарился, поэтому сразу установить жульничество не удалось. Надо быть очень сообразительным человеком, чтобы придумать такой "холодный" способ заработать деньги! Однако "изобретатель" не учел, что сухой лед оставляет ожог, не меньший, чем раскаленный металл.

"Сухой лед" в теплоизолирующей упаковке, как и жидкий диоксид углерода в баллонах и цистернах, выпускается сотнями тысяч тонн.

Особое место среди пищевых низкотемпературных технологий занимает приготовление быстрозамороженных разнообразных готовых блюд. При этом уже замораживаются не исходные продукты, а изделия из них, специальным образом упакованные. Потребитель может хранить их в морозильнике и за 10–15 мин приготовить обед (завтрак или ужин), выложив содержимое на сковороду или в кастрюлю. Известно, что качество таких блюд по вкусу и по питательным свойствам при соблюдении технологии очень высокое.

Если необходимо перевозить или переносить пищевые продукты без охлаждения, но при сохранении их потребительских свойств (в далеких экспедициях, в космосе, на отдаленных базах и т.п.), применяется еще один способ их обработки – сублимационное консервирование.

Идея этого процесса была предложена и запатентована инж. Г. И. Лаппо-Старженецким еще в 1921 г. Однако впервые она была реализована, как это часто случается, за рубежом, вернувшись на родину только в 50-е годы.

Основа сублимационной технологии – то самое древнее испарительное охлаждение, о котором мы упоминали еще в историческом обзоре. Если вести его форсированно, откачивая пар над слоем воды, то, как показал еще в 1775 г. В. Гюллен (см. гл. 3), можно даже заморозить воду. Для этого давление пара должно снизиться примерно до 600 Па, но этот процесс можно и продолжить. Тогда при дальнейшей откачке пара начнется сублимация – лед будет охлаждаться и до более низких температур, частично переходя непосредственно в пар (см. рис. 2.7).

Если вместо сосуда с водой поместить в вакуумной камере какой-либо продукт, содержащий воду (мясо, рыбу, молочные продукты и др.), то с водой, содержащейся в нем, будет происходить то же самое. Пар будет уходить через поры, а остающаяся вода постепенно замерзнет; испарение перейдет в сублимацию. Процесс можно продолжать до тех пор, пока в органических тканях не останется всего 2–5% влаги. Если вести это обезвоживание при нужной скорости, все биологические процессы в продукте замирают и останавливаются. Микроструктура продукта не нарушается – сохраняются все его питательные и вкусовые качества.

Такой продукт при хранении в таре, непроницаемой для воздуха и паров воды, может сохраняться годами, не изменяя своих свойств. Перед использованием в него лишь нужно добавить воду – он разбухает до первоначального объема, а вкус, питательные качества и даже цвет – сразу восстанавливаются.

"Вкусная тема" "пища и холод" – поистине, неисчерпаема; можно говорить и писать об этом очень много. Но пора перейти и к другим приложениям холода. Однако, прежде чем это сделать, нельзя не упомянуть, хотя бы в нескольких словах, о русских национальных замороженных блюдах – сибирских пельменях, каравах хлеба и пирогах с разной начинкой – рыбной, ливером и др. После длительного пребывания на морозе хлеб и пироги делались, побывав в русской печи, пышными и румяными, а корочка на них хрустела не хуже, чем на только что испеченных. Особенно прославился изготовлением мороженого хлеба знаменитый московский булочник Филиппов. Благодаря ему сибиряки могли зимой иметь такой же хлеб, как москвичи и петербуржцы.

Расставшись с гастрономическими применениями холода, перейдем к более фундаментальным направлениям его использования, связанным со строительством и промышленным производством.

Говоря о строительстве, нужно прежде всего вспомнить о главном направлении применения холода – замораживании грунтов. Оно используется при строительстве подземных сооружений – туннелей, шахт, фундаментов плотин и зданий, подземных хранилищ.

При замораживании грунтов содержащаяся в них вода затвердевает и скрепляет подобно цементу частицы грунта в прочный монолит, не пропускающий воду. Его успешно применяют при мощности водоносных слоев в сотни метров.

К 1980 г. при защите работ таким способом пройдено только в горнорудной и угольной отечественных отраслях свыше 700 вертикальных и наклонных стволов общей длиной более 60 км. Самые длинные из них построены на Яковлевском железорудном месторождении (Курской магнитной аномалии), их глубина достигает 600 м.

Самый распространенный способ замораживания – использование специальных колонок (рис. 6.8). В предварительно пробуренные скважины (вертикальные или наклонные) опускают такие замораживающие колонки, по которым после их установ-

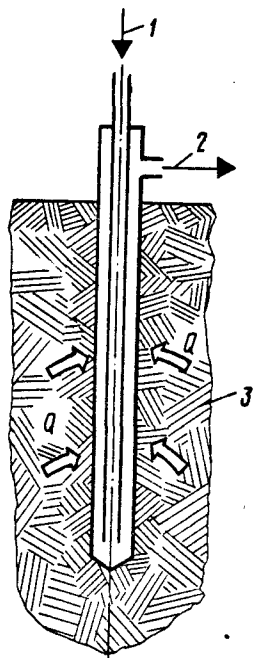


Рис. 6.8. Колонка для замораживания грунта:
1, 2 — вход и выход хладоносителя; 3 — зона
раживания

ки пропускают хладоноситель, например рассол CaCl_2 , с температурой $-(20 \div 25)^\circ\text{C}$. Он подается во внутреннюю трубу и возвращается по наружной, охлаждая грунт через металлическую стенку. Вокруг каждой колонки намерзает ледогрунтовой цилиндр, диаметр которого растет до тех пор, пока он не смыкается с соседним в плотную стенку из замороженного грунта. Охлаждение рассола производится обычно с помощью транспортной холодильной установки.

В зависимости от вида сооружения замораживание грунта либо прекращают после окончания строительства, либо поддерживают в течение всего срока его эксплуатации.

Другое направление использования холода в строительстве — это охлаждение бетона перед кладкой и после нее в период затвердевания бетона. Охлаждение нужно для поддержания соответствующего температурного режима, поскольку бетон при затвердевании выделяет тепло; при этом нужно поддерживать температуры не ниже 0°C .

Среди промышленных производств "негастрономического" характера по масштабам использования холода первое место занимают три родственные отрасли — химическая, нефтяная и газовая.

В химической промышленности холод применяется в самых различных производствах: получение связанного азота (азотной кислоты, аммиака, азотных удобрений), этилена, синтетического каучука, пластмасс, фармацевтических и биохимических продуктов. Без охлаждения все эти технологии просто не могли бы существовать.

Назначение холодильных агрегатов в этих производствах — это либо поддержание необходимого температурного режима, задаваемого соответствующей технологией, либо перевод в жидкое или твердое состояние промежуточных или конечных продуктов. Необходимые низкие температуры здесь самые разнообразные. Для примера можно привести температурные уровни отвода тепла при производстве бутылкаучука: -110 ; -40 ; -20 ; 0 ; $+7^\circ\text{C}$. Мощность холодильных установок при этом может достигать очень больших значений — десятков мегаватт¹.

В нефтяной и газовой отраслях промышленности холод нужен главным образом для того, чтобы выделить из смесей те или другие их компоненты путем вымораживания (из жидкости) или конденсации (из газа).

Примером процесса вымораживания может служить широко применяемая в нефтяной промышленности так называемая "депарафинизация масел" — выделение из них парафина. Подготовка природного газа к транспортированию — пример процесса конденсации. Газ, добываемый из скважин, может содержать воду и тяжелые углеводороды как в жидком, так и в газообразном состоянии, а также механические примеси. В таком виде его, естественно, нельзя пускать в трубопроводы и направлять к потребителю. Вода, соединяясь с углеводородами, образует кристаллогидраты, которые могут забить трубопровод. Другие углеводороды нужно выделять, так как они представляют собой ценное сырье. Очистку газа начинают с сепарации твердых и жидких примесей. В газе остаются водяной пар и различные углеводороды в газообразном состоянии. Их и удаляют путем низкотемпературной конденсации. Температура охлаждения при этом составляет от -5 до -25°C в зависимости от того, в какие районы поставляется газ. Очевидно, что для холодных районов температура сепарации должна быть ниже; в противном случае "недоделанная" часть сепарации произойдет в самом газопроводе на пути к потребителю.

¹ Под мощностью в этом случае подразумевается количество выдаваемого установкой холода — холодопроизводительность в единицу времени, а не мощность, затрачиваемая на приводе установки. Считать производительность по потребляемой энергии — то же самое, что оценивать человека не по тому, как он работает, а по тому, сколько он съедает или получает (к сожалению, такой способ оценки еще часто используется и в быденной жизни, и в технике).

Интересно, что в большинстве случаев низкотемпературная сепарация газа ведется "на самообслуживании", без специальных холодильных установок. Газ выходит из скважин большей частью под высоким пластовым давлением, превышающим 10 МПа. Поэтому холод можно получить простым его дросселированием, используя принцип Линде. Понижение температуры в дросселе составляет несколько десятков градусов.

Более того, поскольку уже очищенный газ подается по магистральным трубопроводам под высоким давлением, а затем его давление должно быть снижено в газовых сетях потребителей, создается возможность использовать этот перепад давлений для получения холода. При этом энергия не только не затрачивается, а наоборот, может быть получена, если расширение газа вести в турбодетандерах¹. На основе использования такого "газового холода" уже проектируются холодильники рядом с крупными потребителями газового топлива – городами, электростанциями и предприятиями.

Можно было бы еще долго перечислять и другие многочисленные направления применения холода – в машиностроении, медицине, радиотехнике, космической технике и научных исследованиях. Поскольку они, как правило, требуют значительно более низких температур, их удобнее описать в гл. 7, посвященной достижениям в криогенной области.

Здесь же нужно сказать несколько слов о еще двух важнейших приложениях холодильной техники, имеющих непосредственное отношение к условиям жизни, работы и отдыха современного человека.

Первое из них – кондиционирование воздуха в жилых, производственных и общественных зданиях, а также на транспорте. Под кондиционированием подразумевается поддержание в помещениях "кондиций" – комфортных условий по температуре и влажности воздуха.

Для нас представляет интерес та часть этой задачи, которая относится к охлаждению воздуха в летнее время. Это, как отметил еще Ф. Бэкон, – более трудная задача, чем отопление зимой. Если не считать императора Гелиогабала и халифа Махди, пользовавшихся для этой цели снегом, то основополож-

ником кондиционирования нужно признать уже известного нам врача и изобретателя Дж. Горри¹.

В 50-х годах прошлого века идея и различные варианты охлаждения воздуха помещений в условиях тропического климата уже широко обсуждались. В теоретическом ее обосновании принял участие крупный английский инженер и термодинамик Дж. Рэнкин; занимался этим и В. Томсон-Кельвин. Уже в 60-е годы известный нам изобретатель Ф. Карре разработал первые системы кондиционирования воздуха для общественных помещений. С 1898 г. фирма Линде начала регулярно поставлять свои холодильные машины, приспособленные для кондиционирования воздуха. Одна из них успешно работала в игральном зале Монте-Карло, охлаждая разгоряченных игроков в рулетку.

Широкое развитие кондиционирование воздуха в современном смысле этого термина – с регулированием не только температуры, но и влажности воздуха в сочетании с его очисткой получило в результате работ В. Кэрриера, создавшего в США крупную фирму, выпускающую и теперь соответствующее оборудование. Кондиционирование распространилось по всему миру; оно применяется в жилых помещениях, гостиницах, театрах, концертных и кинозалах, школах, служебных и производственных помещениях, поездах, самолетах, морских и речных судах... и, естественно, в космических кораблях.

Второе направление использования холодильной техники – в быту. Оно связано с отдыхом и спортом. Коньки, известные с древнейших времен, были и остались одним из самых популярных видов развлечения и спорта для народов, живущих на севере и в умеренном климате. Однако коньками можно было пользоваться лишь зимой, и то не при всякой погоде. В южных странах вообще об этом не могло быть и речи.

Появление холодильной техники сделало возможным создание искусственных ледяных катков и беговых дорожек в любой климатической зоне. Сначала такие катки делались в закры-

¹ О турбодетандерах – детандерах турбинного типа подробно рассказывается в гл. 7.

¹ Будет справедливо, тем не менее, вспомнить, что еще в знаменитой книге Т. Агриколы "De re metallica" (1555 г.) есть иллюстрация, на которой показана машина, нагнетающая в шахту свежий воздух. Правда, здесь использовался природный холод.



Рис. 6.9. Первый искусственный каток (1876 г.)

тых помещениях, а потом, при появлении более мощных холодильных установок, и на открытом воздухе.

Первый искусственный каток (вернее, спортивная ледяная беговая дорожка) был открыт в Челси (Великобритания) в 1876 г.; затем известный нам Пикте построил в Женеве первый большой искусственный каток (рис. 6.9). Если исключить разницу в одежде и головных уборах, то вид этого катка будет мало отличаться от современного. Сейчас такие сооружения распространены во всем мире. Они могут устраиваться как в помещениях, так и на открытом воздухе, могут быть самого разного размера, как стационарными, так и разборными для возможности транспортировки. Например, группы балета на льду используют при гастролях передвижные катки размером 20 x 15 м. Самые большие катки (типа спортивного комплекса в Медео, вблизи Алма-Аты) имеют площади более 10 000 м².

Температура поверхности льда устанавливается в зависимости от характера использования катка $-(0,5 \div 2)^{\circ}\text{C}$ – для скоростного бега на коньках; $-1,5^{\circ}\text{C}$ – для фигурного катания и $-(4 \div 5)^{\circ}\text{C}$ – для хоккея (здесь, естественно, условия самые тяжелые).

Существуют еще и другие многочисленные и самые разнообразные применения холодильной техники: от медицины – гипотермия (охлаждение головного мозга пациента на время операции) до опреснения воды в результате вымораживания (лед, полученный из морской воды, остается пресным), осушки воздуха или обработки семян холодом... Все даже трудно перечислить, тем более что почти каждый день появляются все новые и новые идеи и разработки. Иногда они относятся к очень большим проблемам (например, искусственное увеличение запасов воды в ледниках¹), а иногда и к частным, но не лишенным интереса.

Приведем для примера два недавно появившихся небольших сообщения в печати, относящихся к частным проблемам. Объекты охлаждения в них существенно различаются, но цели – сходны.

1) "У Вас болит голова? Давайте попробуем новый способ лечения: холод. Пластиковая подушка, заполненная желеобразным замороженным веществом, разработана и испытана специалистами двух ведущих американских неврологических клиник. Вы можете постоянно держать ее в морозильном отделении Вашего холодильника, а в нужном случае, надев хлопчатобумажную наволочку, удобно расположить ее вокруг шеи и затылка. Откиньтесь на спинку кресла и закройте глаза. Вам не придется ждать дольше 20 минут!

2) "Вредное воздействие теплового стресса на свиноматок, находящихся в родильных станках, можно уменьшить с помощью приспособления для искусственного охлаждения рыла".

Совершенно естественно, что разнообразные возможности холодильной техники не остались без внимания и писателей-фантастов. На русском языке были написаны две научно-фантастические "холодильные" повести. Автором первой был известный в свое время инженер-холодильщик Н. С. Комаров. Его повесть "Холодный город" выдержала три издания (последнее в 1927 г.). Действие повести проходит в XXII в. и связано с глобальным потеплением вследствие неуставленных причин,

¹ Подробно об этом рассказано в § 6.4.

которое грозило неисчислимыми бедами всему человечеству¹.

Герой повести – американец Том Хэд, главный инженер "Арктической компании холодильных машин" – решил построить "Холодный город" – Колтаун (от английских слов cold и town), в котором могли бы в нормальных условиях, изолированные от атмосферы, жить 10 млн. человек. Кондиционирование воздуха (если пользоваться современной терминологией) и другие холодильные нужды города должны были обеспечивать крупные холодильные установки на базе турбокомпрессоров, дающие каждая 500 млн. фригорий в час². Температура воздуха в городе площадью 100 км² должна была постоянно поддерживаться на уровне +15°C.

Развернулась кипучая работа по строительству Колтауна. В ней принимал активное участие и русский инженер Комов, приехавший к Хэду из России, работавший до этого в Туркестане.

Основную часть рабочей силы, обеспечивавшей строительство города, составляли китайские рабочие, подвергавшиеся жестокой эксплуатации фирмой, которая финансировала работы. Рабочие объявили забастовку, которая была жестоко подавлена. Работы возобновились, но забастовщики решили отомстить – для них Колтаун и все вложенные в него идеи были чужды – чудесный город предназначался другим. И когда уже почти все было закончено, начались испытания и пробные пуски холодильного оборудования, тайная организация забастовщиков взорвала город. Т. Хэд – автор проекта и технический руководитель работ, погиб вместе с городом. Инженер из Польши Чарская и Комов, работавшие совместно на строительстве Колтауна, остались живы и уехали в Россию. Турбоход, на котором Комов и Чарская пересекли океан, назывался "Вперед". В

¹ В этом случае Комаров оказался пророческим. Глобальное потепление уже началось и причина его известна – так называемый парниковый эффект, вызванный тем, что атмосфера, загрязненная примесями CO₂ и CH₄ в результате деятельности человека, задерживает значительную часть теплового излучения Земли.

² Это значение (20·10⁸ кДж/ч холода) соответствует холодильной мощности 500 000 кВт. Наиболее крупные холодильные установки современного типа имеют почти такие же мощности.

России они собирались уже в новых условиях продолжить и завершить дело, начатое Хэдом.

В повести есть все, что должно быть (кроме науки и техники) в литературе научно-фантастического жанра: опасности и приключения, любовь и смерть...

Для нас теперь особый интерес представляют научно-технические прогнозы автора, и особенно та их часть, которая относится к России. Здесь есть много любопытного. Прежде всего, это предсказание о том, что "к концу XX в. холодильное дело достигнет наибольшего развития в Европе, именно в необъятной России". В частности, Комаров предсказывал, что в это время "холодильники Москвы при населении в 5 млн человек смогут вместить около 4 млн пудов различных скоропортящихся пищевых продуктов". Насчет населения он ошибся в 2 раза, а что касается вместимости московских холодильников, то в 1990 г. она составила 904 тыс. т (14,5 млн пудов), т.е. более чем в 3 раза выше.

Предсказал Комаров и то, что именно в Москве соберется 21-й Всемирный холодильный конгресс. В этом случае жизнь даже опередила предсказание: Конгресс Международного института холода действительно собрался в Москве, но не 21-й, а 15-й, и значительно раньше – в 1975 г.

Что касается техники, то в книге говорится о многих изобретениях, очень близких к тем, которые действительно появились (и не в XXII в., а в конце XX в.). Упоминаются, например, изолирующий материал "атермит", сделанный из пористого вакуумированного стекла, охлаждаемые костюмы "Фриго" из пористого материала и др. Вместе с тем автор несколько недооценил возможности будущей техники: он пишет об уникальных электродвигателях мощностью 60 000 кВт (уже сейчас изготавливаются и работают двигатели мощностью 100 000 кВт). Есть в книге и ряд других прогнозов, которые не совсем удачны. Отметим в заключение, что в ней есть и некоторые предостережения, относящиеся не к технике, а к быту и образу жизни людей XXII в. В частности, упоминаются и "адамиты" – люди, удивительно напоминающие современных "хиппи".

Есть в книге и много других любопытных моментов, показывающих, как представляли себе будущее люди начала XX в.

"Холодильной" теме посвящен и очень интересный рассказ А. Беляева "Пропавший остров", опубликованный впервые в 1935 г. В нем описывается история создания в Атлантическом

океане искусственного ледяного острова, который предназначался для промежуточной посадки и заправки горючим самолетов, совершающих рейсы между Европой и Америкой. Здесь тоже главный герой – талантливый инженер, сталкивающийся с трудностями, создаваемыми общественной системой.

Рассказ читается с большим интересом. Несколько упрощенная фабула с линейно-свирепой капиталистической конкуренцией не слишком мешает ходу повествования; автор очень квалифицированно показывает огромные возможности холодильной техники.

В принципе, идея рассказа А. Беляева вполне осуществима. Интересно, что план использования плавающих ледяных островов – айсбергов (правда, для несколько других целей) прорабатывается уже в наше время достаточно серьезно. Но это уже относится к применению природного холода, льда и снега; об этом – в § 6.4.

6.4. ПРИРОДНЫЕ ХОЛОД И ЛЕД НА СЛУЖБЕ ЧЕЛОВЕКУ – ДЕЛО НЕ ТОЛЬКО ПРОШЛОГО, НО И БУДУЩЕГО

Холодильная техника, естественно, сильно потеснила за последнее столетие древние способы охлаждения, основанные на использовании природного холода. Заготовка природного льда свелась в наше время почти к нулю. Однако наивно было бы полагать, что холодильная техника, при всех ее достижениях, должна полностью вытеснить из низкотемпературной технологии холод, который дает природа. Отец невесты в "Свадьбе" Чехова, который предпочитал "натуральное" – "умственному", был в определенной степени прав. Оказалось, что по мере развития цивилизации, когда задачи организации ее рационального взаимодействия с живой природой (экологические) выходят на первый план, ситуация существенно меняется. Сокращение расходов материалов и энергии становится не только экономической задачей, но в полном смысле слова – вопросом жизни. Соответственно возрастает и значение экологически чистого естественного холода.

Рассмотрим небольшой пример. Разве не вызывает сомнений необходимость тратить электроэнергию (а следовательно, топливо и материалы) на работу не только крупных, но и бытовых холодильников зимой, когда рядом, за стеной, температура воздуха такая же, как и в холодильнике, а иногда не выше

чем в морозильнике с четырьмя звездочками? Можно возражать, что холодильной техникой пользоваться удобнее – она не зависит от капризов природы, легко регулируется... Это, конечно, верно, но не может изменить дела в принципе. Можно, по-видимому, найти пути, позволяющие и в этом, и в других случаях, используя природный холод, сократить расход материальных и энергетических ресурсов.

Однако этим дело не исчерпывается. Природный холод и лед можно использовать не только пассивно для охлаждения, как делали наши предки. Есть и другие, новые возможности, простирающиеся от получения пресной воды в засушливых районах до выработки электроэнергии на базе природного холода. Кроме этого, изучение живой природы Севера и других холодных районов Земли дает интереснейший материал для использования ее секретов в практических целях.

Прежде чем перейти к анализу возможностей, полезно провести некоторую "инвентаризацию" – посмотреть, какими запасами льда мы (т.е. человечество) располагаем. Не возникнет ли опасение, что их недостаточно?

Общие запасы природного льда на Земле превышают 30 млн км³ – это куб со стороной, равной 311 км! Если его поставить на поверхность Земли, то верхняя грань выйдет в Космос на уровень, где летает большинство искусственных спутников. Основная его масса сосредоточена в ледниках Антарктиды, Гренландии и горных районов. Второе место занимают подземные льды (вечная мерзлота); их в 60 раз меньше, чем ледниковых. Тем не менее их очень много. В России вечной мерзлотой занята колоссальная площадь – около 10 млн км² (примерно 47% территории). В Канаде и Аляске доля ее еще больше (соответственно 50 и 80%).

Третье и четвертое места занимают морские льды и снежный покров. Хотя здесь льда в сотни и тысячи раз меньше, чем в ледниках, его и в таком виде более чем достаточно.

Наконец, некоторое количество льда и снега находится в атмосфере. Лед и снег образуются при конденсации водяного пара, поднимающегося с поверхности земли, морей и океанов. Таким образом, испарившаяся вода возвращается на землю не только в виде дождя, но и в замороженном виде – как снег и град. В отличие от снега град выпадает летом и не только в средних широтах, но и в южных районах, и даже в тропиках – в Африке, Индии, Средней Азии, на Кавказе и др. Градины бы-

вают самыми разными, иногда они достигают очень больших размеров – до 10–15 см в поперечнике и даже более. Известен случай, когда градина (в Индии, 1961 г.) убила слона. Ее масса была равна 3 кг. Очевидно, однако, что такого рода "естественный холод" мало пригоден для использования, хотя и падает с неба в теплое время.

Несмотря на колоссальные общие запасы всех видов природного льда, необходимо его разумное использование, не нарушающее локального природного равновесия. При соблюдении этого условия природный холод может дать многие полезные результаты. Здесь мы расскажем только о четырех направлениях, о которых упоминалось выше.

Начнем краткий их обзор с классического применения для низкотемпературного хранения продуктов. Оно может быть как сезонным, так и круглогодичным.

Сезонное летнее хранение осуществляется, как известно, посредством льда, заготавливаемого зимой. Расцвет этого издревле известного вида хранения продуктов наступил, когда холодильные машины еще не получили массового распространения, а объем хранения и транспортировки пищевых продуктов уже резко возрос. Природный лед стал ходовым товаром.

Приоритет в торговле природным льдом принадлежит американцам. Еще в начале XIX в. Ф. Тюдор (не имеющий отношения к английской королевской династии Тюдоров) по прозвищу "Король льда" организовал в Бостоне фирму, которая экспортировала лед сначала в южные штаты, а затем в Центральную и Южную Америку. В дальнейшем он добрался и до Индии, экспортируя лед в Калькутту! В Гаване и Калькутте лед стоил всего 10–12 центов за килограмм.

Общий объем американского экспорта льда вырос от 130 т в 1806 г. до максимума в 1872 г. – 225000 т, после чего стал снижаться: в 1900 г. он составил только 13700 т. Заготовка такого количества льда потребовала создания целой отрасли по заготовке льда в зимние месяцы на замерзших реках и озерах северо-востока США. Так как лед использовался и внутри страны, общая его добыча в 70–90-е годы была намного больше, чем экспорт (например, в 1886 г. его было добыто 25 млн т). Техника добычи хорошо видна на рис. 3.1, взятом из литературы того времени. Выпиленные блоки льда (так называемые "пирожные" по 10–15 т) вытаскивались на берег, пилились на

части и доставлялись на склад, где сохранялись под слоем опилок, служивших теплоизоляцией.

В Европе лед в основном добывался в Норвегии и России как для внутреннего потребления, так и на экспорт. Экспорт льда из нашей страны производился вплоть до второй мировой войны; в 1939 г. было вывезено 14 млн т льда, за которые было получено 14 млн руб.

Теперь, к концу XX в., летнее хранение продуктов на базе природного льда почти не применяется.

Иная картина наблюдается с круглогодичным хранением. Для него идеально подходит вечная мерзлота – среда, в которой может быть создан практически вечный холодильник. Мы уже упоминали о мамонтенке Диме, который был обнаружен в верховьях Колымы. Таких находок было великое множество – и не только мамонтов, бизонов и других животных, но и людей. Например, в Андах (Чили) в 1954 г. был найден мальчик-инка, которого похоронили около 500 лет назад в слое вечной мерзлоты. Известны и многочисленные холодные склады пищевых продуктов, оставленные полярными исследователями и обнаруженные спустя много десятилетий последующими экспедициями.

Самый старый склад такого рода – это мясные консервы, оставленные в 1815 г. в Арктике экспедицией русского ученого О. Е. Коцебу. Они были обнаружены в 1905 г. (т.е. через 90 лет) в состоянии, вполне пригодном для питания.

Более разнообразное меню можно было составить из продуктов, оставленных в вечной мерзлоте на Таймыре в 1900 г. экспедицией Э. В. Толля. Там были сухари, банки консервированных щей и два запаянных жестяных ящика – один с 6 кг овсянки, а другой с сахаром, шоколадом и кирпичным чаем.

Этот склад обнаружила в 1974 г. экспедиция газеты "Комсомольская правда". Продукты не только отведали на месте, но и проверили в Москве – как лабораторным путем, так и приготовив и с удовольствием продегустировав щи с мясом и кашей, завершив трапезу чаем с шоколадом.

Чтобы выяснить, позволяет ли класс современной отечественной пищевой промышленности создать длительно хранящиеся блюда, не уступающие тем, которые готовили у нас в начале века, рядом со складом Толля в 1974 г. уложили в мерзлоту новую порцию продуктов, качество которых намечено проверить в 1980, 2000 и 2050 гг. Первая проверка была проведена в срок и показала отличное качество продуктов.

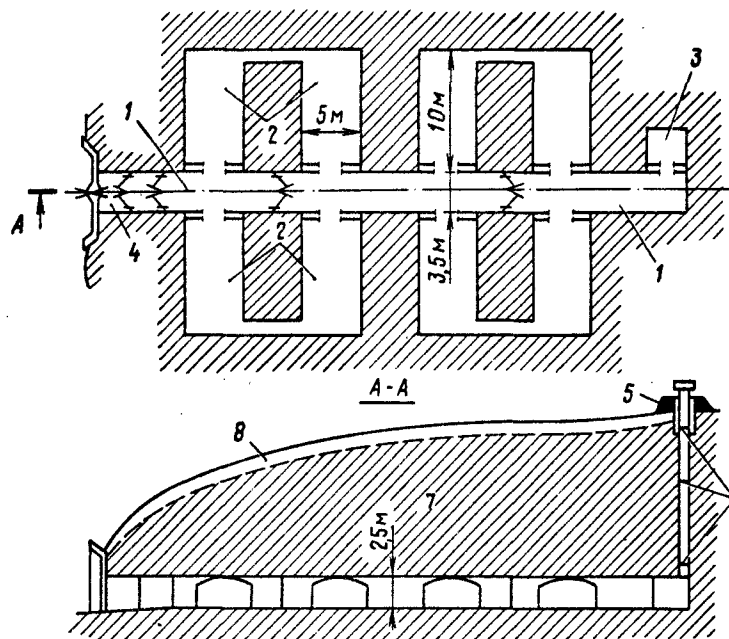


Рис. 6.10. Схема холодильника-мерзлотника:

1 — штольня; 2 — холодильные камеры; 3 — вентиляционная камера; 4 — тамбуры; 5 — жесткая гидроизоляция; 6 — люки; 7, 8 — вечномёрзлый и оттаивающий летом грунты

Любопытно отметить, что в вечной мерзлоте хорошо сохраняется дерево (древесина лиственницы, извлеченной вблизи места, где был найден мамонтенок Дима, пахла смолой, как свежесрубленная). Более того, известен случай, описанный английским исследователем М. Блэком: семена арктического люпина после нескольких тысяч лет пребывания в холодных норах полярных мышей-леммингов дали всходы! Научное и практическое значение этих и подобных им фактов трудно переоценить. Если же говорить о существующих промышленных холодильниках в зоне вечной мерзлоты, то, к сожалению, их не так много. Они сделаны только в нескольких сибирских городах, в частности в Норильске (вместимостью 450 т продуктов).

Обычно холодильник-мерзлотник устраивается на склоне горы, чтобы можно было проложить в глубь мерзлоты горизонтальную штольню, как показано на рис. 6.10. Эксплуатация хо-

лодильника должна, естественно, вестись так, чтобы тепло, выделяемое продуктами и вносимое при загрузке и выгрузке, не нарушило температурного режима слоя мерзлоты. Для этого, в частности, на входе предусмотрено несколько последовательно расположенных тамбуров, а штольня имеет длину, превышающую 100 м.

Экономически такой холодильник очень выгоден, тем более что специальных креплений стен и потолков делать не нужно.

Новые пути использования природного льда, выходящие за пределы традиционного хранения пищевых продуктов и создающие ряд многообещающих возможностей, привлекают в последнее время все больший интерес.

Получение пресной воды из льда в засушливых районах связано с двумя перспективными группами проектов. Первая из них основана на использовании айсбергов, вторая — на искусственном увеличении массы ледников в горах (и соответственно речного стока от их таяния в летнее время).

Айсберги — плавающие ледяные горы, которые откалываются от материковых и шельфовых¹ ледников Антарктиды, Арктики и Гренландии и пускаются в плавание по морям. Так как плотность льда ненамного меньше плотности воды, то большая часть (примерно 9/10) плывущего айсберга скрыта под водой. Высота (а точнее — глубина) их подводной части достигает десятков, а то и сотен метров. Что касается их площадей и объемов, то они вообще могут быть неправдоподобно огромными, особенно у антарктических, так называемых "столовых", айсбергов. Один такой уникальный "стол", обнаруженный в 1966 г., имел площадь, равную площади Бельгии и объемом около 5000 км³. Объемы айсбергов порядка 10 и 100 км³ — совершенно рядовое явление. В целом же айсберги уносят в океан только из Антарктиды около 700 млрд т чистой пресной воды в год, что составляет более 300 т на каждого жителя Земли.

Совершенно естественно, что возникла идея доставки хотя бы небольшой части этой зря пропадающей воды в засушливые зоны. Правда, есть достаточно эффективные способы опреснения морской воды. Однако пресная вода, полученная из

¹ Шельф (от английского слова shelf — "полка") — подводное продолжение материка, морское дно у побережья, лежащее на глубине 100–200 м.

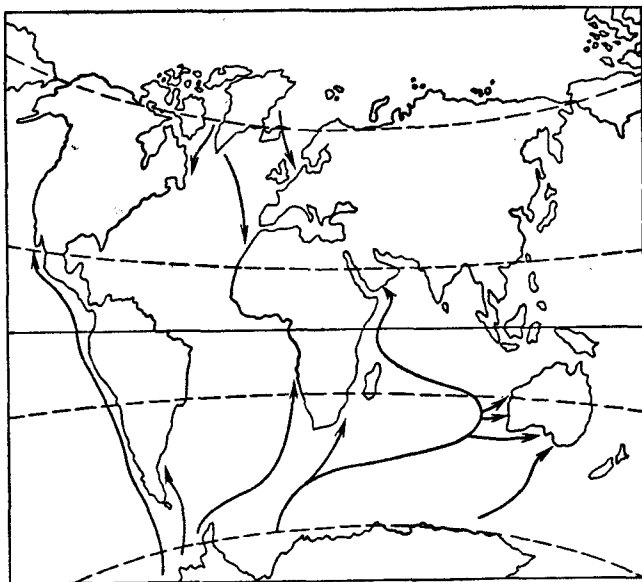


Рис. 6.11. Возможные маршруты транспортировки айсбергов (по Р.А. Крыжаскому, 1985 г.)

морской, как и ее дальняя транспортировка, обходятся дороже.

Несмотря на возможные сложности, связанные с буксированием айсбергов на дальние расстояния, и дополнительные затраты (на изоляцию, уменьшение таяния по дороге, прием в гавани, организацию плавления и др.), анализ задачи и расчеты показывают реальность таких предложений.

Например, разработан проект транспортировки айсбергов массой порядка 10 млн т из Антарктиды в Саудовскую Аравию на расстояние примерно 8000 км. Стоимость воды составит около 0,5 дол. за 1 м³, что ниже, чем опресненной морской воды.

Аналогичные расчеты сделаны и для других маршрутов, показанных на карте (рис. 6.11).

Интересно, что при таянии айсберга может быть получено больше воды, чем в нем содержится, — за счет конденсации влаги из воздуха на его холодной поверхности. Есть и другие варианты использования льдов Антарктиды. В Австралии разработан предварительный проект пневматической транспортировки по трубопроводу из Антарктиды смеси дробленого льда

с водой. Проложить такой трубопровод по дну океана не так уж сложно, тем более что от Антарктиды до Австралии не так далеко — всего 4000 км.

Пока эти грандиозные, хотя и вполне реальные (и главное — экологически чистые) проекты не осуществились; торговля льдом айсбергов пока идет только в малом масштабе. Гренландия продает его по несколько десятков тонн в год Японии и США. Хотя он и относительно дорог (пакет льда стоит несколько долларов), спрос на него устойчив — ведь это не просто речной лед, а чистейший продукт, образовавшийся тогда, когда человек еще не успел загрязнить окружающую среду.

Если эта группа проектов основана на использовании уже существующих запасов льда, то вторая идет дальше: здесь идея основана на искусственном увеличении его запасов в горных ледниках.

Известно, что многие реки берут свое начало от тающих горных ледников. Примером могут служить реки Сырдарья и Амударья, истоки которых находятся в горах Памира. Чем больше выпадает снега зимой в горах, тем больше запасы льда в ледниках и тем больше сток рек в летние месяцы. Следовательно, искусственное увеличение в зимнее время количества осадков может дать (при соответствующем масштабе мер) существенную прибавку водного баланса. Оказывается, что это вполне возможно и связано с относительно небольшими затратами. Нужно только создать в атмосфере условия, способствующие конденсации и кристаллизации содержащегося в ней водяного пара¹. Для этого с самолетов выпускают в атмосферу струю хладагента. Наиболее всего для этой цели подходит жидкий диоксид углерода CO₂, который при дросселировании превращается в порошок сухого льда. Температура кристаллов CO₂, равная -78°C, обеспечивает вымораживание паров воды из воздуха. Образовавшиеся мелкие льдинки образуют облака, которые дают осадки в виде снега.

¹ Идея создания искусственных облаков в результате разбрызгивания в атмосфере холодных жидкостей появилась уже давно. Еще в 20-е годы один из руководителей знаменитой Лейденской лаборатории Камерлинг-Оннеса проф. В. Кеезом поднимался в воздух на самолете, имея большое число сосудов Дьюара с жидким воздухом. Выливая из них, один за другим, жидкость за борт, он добился образования облаков, но осадков не получилось.

Такие опыты производились зимой 1989–1990 гг. в Узбекистане. В результате распыления CO_2 в Искемской долине выпало снега на 60–100 мм больше, чем обычно (а каждый дополнительный 1 м^3 воды стоил 0,15 коп.).

Искусственное выпадение снега можно осуществить при относительно небольших затратах (поскольку жидкий диоксид углерода CO_2 дешев) на площадях порядка 1000 км^2 .

В горах этим способом можно накопить в ледниках около 10 км^3 льда и тем самым не только увеличить сток рек, но и пополнить Арал. Этот способ несопоставимо дешевле, чем пресловутый "поворот северных рек", не говоря уже о том, что не влетит за собой никаких вредных последствий¹. В атмосфере постоянно находится в процессе круговорота 12–13 тыс. км^3 воды!

Не менее интересные возможности открывает использование природного холода для выработки электроэнергии в северных районах (где она особенно дорога). Решение задачи основано, в конечном счете, на идее, высказанной очень давно проф. Д'Арсонвалем в статье, появившейся во французском журнале "Revue Scientifique" ("Научные известия") в сентябре 1881 г. Эта статья в то время не произвела особого впечатления и была забыта, так же как и последующие проработки начала XX в., сделанные в США, Германии и Италии.

Сущность идеи заключалась в использовании существующих в природных условиях разностей температур для работы паросилового цикла, приводящего в движение электрогенератор. Такие разности температур характерны для морей как в тропических условиях, так и в Арктике и Антарктике; в средних широтах таких условий нет.

Только в 1926 г. Парижская академия наук получила сообщение, подписанное Ж.Клодом² и П. Бушери, об экспериментальной проверке идеи Д'Арсонваля и намерении авторов осуществить ее на практике. Они писали: "Как известно, морская вода

¹ Количество CO_2 в атмосфере тоже не увеличится, так как жидкий диоксид углерода добывается из дымовых газов, которые все равно выпускаются в атмосферу.

² Ж.Клод, создатель первого работающего детандера, о работах которого по ожижению воздуха упоминалось в гл. 4; Д'Арсонваль был одним из его старых друзей.

имеет на глубине 1000 м температуру 4–5°C. С другой стороны, известно, что температура поверхности тропических морей в основном колеблется от 26 до 30°C. Исходя из этих двух фактов, можно набросать грандиозный план использования тепла морей...

...Использовать глубинные воды на первый взгляд кажется затруднительным. Но эти затруднения легко побороть, так как достаточно опустить до желаемой глубины хорошо изолированную трубу; тогда холодная вода поднимется по этой трубе..."

Ж.Клод после нескольких неудачных попыток, связанных с трудностями при погружении длинной трубы в море, добился на Кубинском побережье частичного успеха. В октябре 1930 г., после погружения трубы на 600 м, используя воду с температурой 14 и 28°C, удалось создать паровой цикл и получить мощность 26 кВт.

На эти опыты Клод и Бушери потратили из собственных средств около 1 млн долл.¹ Дальнейшие опыты, вследствие ряда неудач, связанных с трудностями погружения трубы на большую глубину, были оставлены.

Однако идея Д'Арсонваля возродилась уже в послевоенные годы, только в другом, полярном ("холодном") варианте. В нем температуры распределялись наоборот: вода подо льдом значительно теплее холодного воздуха над ним. Паруемая природой разность температур при этом будет значительно больше. На северном побережье России средняя зимняя температура воздуха составляет (с ноября по март) от –25 до –30°C, а воды от –1 до –3°C. Нет также необходимости качать воду из глубины – достаточно опустить трубу под лед.

Предложено много вариантов схем таких электростанций. Наиболее приемлемая из них показана схематически на рис. 6.12.

Рабочее тело (такое же, как в холодильной установке – аммиак, экологически чистый фреон или углеводород, сконденсированный посредством холодного воздуха) стекает из конденсатора в насос, откуда подается в испаритель. Здесь под высоким давлением, создаваемым насосом, он испа-

¹ После успехов в создании детандера, описанных в гл. 5, Ж.Клод создал крупную фирму "Лэр Ликид" по выпуску воздухоразделительных установок и получению продуктов разделения (кислорода, азота и инертных газов), существующую до сих пор.

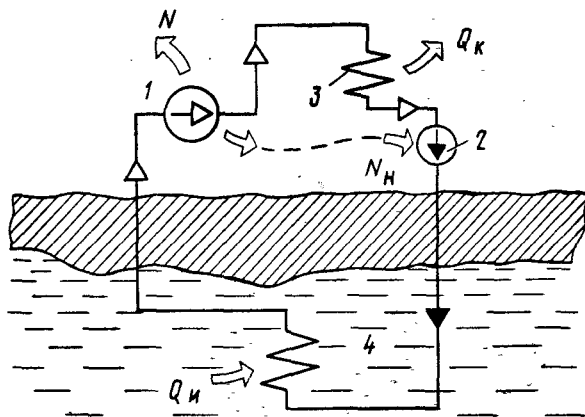


Рис. 6.12. Принципиальная схема электростанции, работающей на разности температур холодного воздуха и "теплой" воды под льдом:

1 — турбина с электрогенератором; 2 — насос; 3 — конденсатор; 4 — испаритель

ряется, нагреваемый относительно "теплой" морской водой. Пар высокого давления поступает в турбину. Работа турбины передается электрогенератору, вырабатывающему электроэнергию, отдаваемую потребителю. Часть этой энергии отдается питательному насосу, перекачивающему жидкость. Отработанный пар низкого давления возвращается в конденсатор, и цикл замыкается. Если в такой схеме использовать, например, аммиак, то его давление в испарителе составит примерно 0,45 МПа, а в конденсаторе — 0,17 МПа. Это отношение давлений вполне обеспечивает работу турбины.

Нетрудно видеть, что при этом повторяется классическая схема тепловой электростанции, работающей на водяном паре. Разница состоит только в том, что испарение рабочего тела производится не горячими дымовыми газами, а "теплой" морской водой, а его конденсация — уже не водой, а холодным воздухом. Электростанции такого типа очень перспективны; в зимнее время они могут полностью заменить электростанции, работающие на дорогом дизельном топливе.

К сожалению, работам по созданию, совершенствованию и внедрению таких электростанций (так же, как и других нетрадиционных источников энергии) в России не уделяется достаточного внимания.

Чтобы завершить этот краткий экскурс во взаимоотношения природного холода и возможностей его использования на благо человека, необходимо вспомнить о том, что природный лед на водоемах может служить дорогой в зимнее время. Знаменитая "дорога жизни" через Ладожское озеро, позволившая спасти от гибели во время блокады сотни тысяч ленинградцев, — наглядный пример.

Наконец, нельзя пройти мимо того, как природа формировала животный мир Севера и при этом находила чрезвычайно оригинальные решения. Изучение связанных с ними тайн, которые хранит живая природа холодных районов, открывает совершенно неожиданные факты.

Приведем только один пример — устройство шкуры белого медведя. Казалось бы, ничего особенного в ней нет. Действительно, мех густой, теплый, покрывает даже подошвы лап, он смазан жиром, что позволяет ему не намокать в воде. Все это хорошо, но не выходит за пределы привычных представлений. Однако оказалось, что устройство медвежьей шкуры намного сложнее; оно достойно того, чтобы стать одним из объектов бионики¹.

Обнаружилось это, когда американские биологи попытались провести "перепись" белых медведей в Арктике простым способом — посредством инфракрасной съемки с воздуха. Считалось, что как бы хорошо не был теплоизолирован медведь своей шкурой, какое-то количество тепла должно проникать через нее наружу. Поэтому медведь, более теплый, чем снег, должен быть ясно виден на инфракрасных снимках. Однако оказалось, что его на пленке не видно! Секрет в том, что температура поверхности шкуры медведя практически не отличается от температуры поверхности снега. На снимках в ультрафиолетовых лучах медведь виден, но как темное пятно. Это означает, что медведь не отражает ультрафиолет; напротив, он его, в отличие от поверхности, на которой находится, поглощает! Выяснилось, что волоски медвежьей шерсти полые и представляют собой своеобразный светопровод, подобный по своему действию нитям волоконной оптики. В результате таких манипуляций с излучением Солнца медведь греется на

¹ Бионика — наука, изучающая структуры и функции живых организмов в целях их воспроизведения техническими средствами для практического использования.

морозе, оборачивая энергетический баланс в свою пользу — он поглощает почти полностью ультрафиолетовое излучение и не отдает инфракрасное. Природа Арктики, Антарктики и других холодных регионов хранит еще много таких интересных секретов.

Описание многочисленных преимуществ природного холода может создать впечатление, что холодильники забывают о его отрицательных сторонах. Конечно, это не так. Они прекрасно знают, что холод приводит к снежным заносам, обвалам, лавинам, катастрофам на море, гибели людей... Он вызывает обледенение летательных аппаратов, разрушение фундаментов, разрывы проводов электропередач, градобитие... Всего и не перечислить. Чтобы все это предотвращать, есть единственный путь — изучать причины и изобретать способы защиты.

История науки и техники знает и другие трудности, преодолеть которые иногда сложнее, чем те, которые создает природа. Они связаны с влиянием политических событий. Наглядно иллюстрирует это положение история криогеники XX в., к которой мы перейдем в следующей главе.

Глава седьмая

КРИОФИЗИКА XX В.

В новой области низких температур, близких к абсолютному нулю, шум и суета, связанные с тепловым движением частиц, почти исчезают; создается возможность познать глубинные свойства материи.

Г. Камерлинг-Оннес

7.1. ЖИДКИЙ ГЕЛИЙ.

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И МАГНИТНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Ожижение гелия Камерлинг-Оннесом в 1908 г. открыло путь в область температур, при которых с веществом, в первую очередь с самим гелием, стали происходить новые, совершенно неожиданные вещи.

До этого все газы, в том числе и "постоянные", вели себя как и полагалось любому законопослушному веществу. Ниже своей критической температуры они исправно ожижались, а при дальнейшем охлаждении, достигнув температуры тройной

точки, затвердевали. Естественно было ожидать, что и гелий после того, как его ожижили, будет вести себя так же. Однако оказалось, что гелий упорно отказывается затвердевать. Камерлинг-Оннес, думая, что дело просто в недостаточном понижении температуры, охладил его откачкой пара сначала до 2,5 К, понизив давление над ним приблизительно до $1 \cdot 10^{-3}$ МПа. В 1909 г. он откачал пар до давления 267 Па, при этом температура гелия понизилась до 1,38 К, но никаких признаков затвердевания не появилось. Г. Камерлинг-Оннес решил, что тройная точка гелия находится еще ниже. Он применил самые мощные вакуумные насосы, которые могла создать техника того времени, и понизил еще температуру, доведя давление пара над гелием до 26,7 Па. Но и при этом, всего на расстоянии от абсолютного нуля немного больше, чем 1° (1,04 К), гелий упорно оставался жидким!

Г. Камерлинг-Оннесу не суждено было узнать разгадку этого непонятного поведения гелия; она раскрылась уже после его смерти. Забегая несколько вперед (об этом подробнее будет сказано ниже), можно сказать, что секрет заключался в невероятном факте: у гелия вообще не существует тройной точки!

Дальше вниз по температурной шкале в эти годы пойти не удалось. Вакуумная техника того времени не позволяла еще существенно уменьшить давление пара над жидким гелием и тем самым понизить его температуру. Другие же способы получения таких "ультранизких" температур тогда еще не были известны.

Внимание исследователей было привлечено и другим, не менее загадочным явлением.

Было известно, что электрическое сопротивление металлов падает с понижением температуры. Однако, как оно будет вести себя при гелиевых температурах (ниже 4,2 К), было件ясно.

Существовали теории, основанные на том предположении, что электроны, несущие ток, при абсолютном нуле будут плотно связаны с атомами, не смогут переходить от одного к другому, и поэтому электропроводимость тоже снизится до нуля.

Были и сторонники противоположного взгляда, утверждавшие, что электроны будут совершенно свободны при абсолютном нуле температуры и сопротивление полностью исчезнет.

Чтобы внести ясность в этот вопрос, нужно было экспериментировать с очень чистыми металлами; даже самые малые при-

меси сильно влияли на их электропроводимость. Металлом, который наиболее удобно было очистить, была ртуть. Очистка проводилась путем ее перегонки – испарением и конденсацией. Самые первые опыты в апреле 1911 г. с проводником из ртути показали, что электрическое сопротивление при температуре ниже 4,2 К исчезало. Однако по какому закону это происходило – оставалось неясным. Камерлинг-Оннес считал (и даже вывел соответствующую формулу), что это происходит постепенно, по мере понижения температуры. Однако следующая серия опытов, проведенных через месяц, дала совершенно неожиданный результат: электрическое сопротивление ртути при понижении температуры до 4,15 К исчезало скачком, сразу (рис. 7.1).

Сообщение Камерлинг-Оннеса об этих опытах так и называлось "О неожиданном изменении скорости, с которой исчезает сопротивление ртути". Дальнейшие его исследования (1912 г.) показали, что и некоторые другие металлы, например олово и свинец, теряют электрическое сопротивление тоже скачком (соответственно при 3,72 и 7,19 К). Это явление, названное Камерлинг-Оннесом *сверхпроводимостью*, не вписывалось ни в какую существовавшую в то время физическую модель электропроводности металлов.

В дальнейшем Камерлинг-Оннес придумал наглядный опыт, показывающий необычайные свойства сверхпроводящего металла. Его схема показана на рис. 7.2. Катушка 4 из свинцового провода помещена в сосуд Дьюара 7, заполненная жидким гелием. В катушку можно пускать электрический ток от батареи 1, замыкая ключ 2 (ключ 3 разомкнут). Ток, протекая в катушке 4, создавал магнитное поле, которое фиксировали стрелки компасов 5 и 6. Если затем замкнуть ключ 3, а ключ 2 разомкнуть, то ток от батареи в соленоид уже не будет поступать; он будет замкнут накоротко. Если бы катушка 4 была сделана из обычного проводника, ток в контуре быстро бы исчез вследствие ее сопротивления; отклонение магнитных стрелок полем прекратилось. Однако, поскольку сверхпроводящая катушка не имеет сопротивления, ток в контуре продолжает циркулировать, и отклонение стрелок это показывает. Так может продолжаться практически неограниченное время, поскольку рассеяния энергии в сверхпроводящем контуре не происходит. В оставленной под наблюдением катушке с током не произошло никаких изменений; в течение двух лет ток не уменьшился.

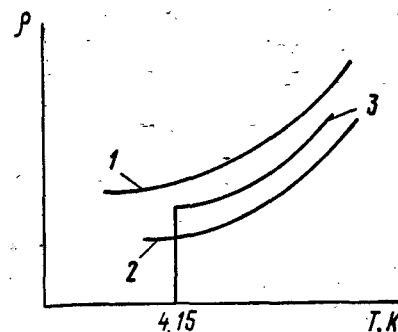


Рис. 7.1. Характер изменения удельного электрического сопротивления ρ для нормального металла (1, 2) и сверхпроводника Рб (3) при понижении температуры

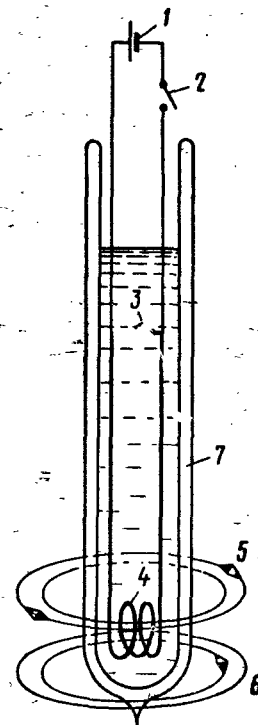


Рис. 7.2. Соленоид из сверхпроводника с "вечно" циркулирующим током

Такое "чудо" до открытия сверхпроводимости даже представить себе никто не мог. Что же касается объяснения, то его не могли дать еще долго. Вообще дальнейшее изучение сверхпроводимости, которое продолжается и до сих пор, открыло еще много новых эффектов.

За комплекс работ в области криогеники Камерлинг-Оннес получил в 1913 г. Нобелевскую премию по физике. В традиционной лекции, прочитанной им при получении этой премии, он пророчески сказал о том, что исследования в новой области низких температур, где шум и суета, связанные с тепловыми колебаниями, почти исчезают, приоткрывают завесу, и создается возможность познать глубинные свойства материи.

Первые шаги в эту новую область сделал он сам. В дальнейшем работы группы Камерлинг-Оннеса должны были продолжиться. Однако через год, в 1914 г. началась первая мировая война, открывшая целую полосу революционных катаклизмов и радикальных изменений в жизни всех народов не только в Европе, но и в других районах мира. Естественно, что все эти

события оказали значительное влияние на развитие как науки, так и техники. Не были исключением и низкотемпературная область. Война и последующие события в частности сказались в почти полном прекращении международных научных связей в Европе с 1914 по 1920 г. Лаборатория Камерлинг-Оннеса тоже оказалась на это время в изоляции и без средств. Работы в ней почти замерли.

Криофизика, развитие которой почти прекратилось, начала оживать только в 20-е годы. Оживление происходило очень быстро; в последующие десятилетия открытия в этой области пошли одно за другим. Достаточно сказать, что за работы по физике низких температур после Камерлинг-Оннеса Нобелевские премии были присуждены еще 4 раза (1920 г. – В. Нернсту, 1949 г. – У. Джиоку, 1962 г. – Л. Ландау, 1978 г. – П. Капице)¹.

Эти четыре фамилии будут ниже в соответствующих местах неоднократно упоминаться наряду с другими, обладатели которых тоже сделали крупные вклады в низкотемпературную науку, но не удостоились столь высоких наград (В. Кеезом, П. Лебай, В. де Хаас, Л. В. Шубников, Э. Андроникашвили, В. Мейснер, В. П. Пешков и др.).

Прежде чем обратиться к новым достижениям и трудностям послевоенного периода, нужно на короткое время вернуться немного назад, к Камерлинг-Оннесу. За четыре года до смерти он предпринял последний штурм, чтобы взять еще один рубеж на пути к абсолютному нулю. Применяв для откачки паров над жидким гелием 12 мощных вакуумных насосов, он понизил его температуру до 0,83 К. Сообщение об этом он озаглавил: "О самой низкой температуре, полученной до сих пор". Сообщение заканчивалось обсуждением вопроса – "можно ли считать, что достигнут абсолютный предел движения к низким температурам?" Такая постановка была совершенно естественной – стало очевидно, что, применяя прямую откачку пара, дальше уже двигаться было практически невозможно. Нужно было либо найти другое вещество с еще более низкой температурой кипения, чем гелий, либо изобрести совсем другой, новый способ понижения температуры.

Г. Камерлинг-Оннес не знал, какая из этих возможностей будет реализована (впоследствии оказалось, что обе), но не

сомневался в успехе: "Мы должны быть уверены, что препятствие, появившееся на нашем пути, будет преодолено, и главное, что требуется – длительное и терпеливое исследование свойств вещества при самых низких температурах, которые только можно получить".

Именно на этом пути найдены были и новые способы дальнейшего понижения температуры, и еще более "холодное" вещество, чем обычный гелий.

Новый способ охлаждения был изобретен в 1926 г. через несколько месяцев после смерти Камерлинг-Оннеса. И здесь так же, как в свое время у Кайете и Пикте, а затем у Линде и Хэмпсона, проявилась та же закономерность: одна и та же идея возникла одновременно у двух разных, незнакомых друг с другом исследователей. Один из них – канадец У. Джиок, представил статью с описанием своего метода в редакцию журнала 17 декабря. Другой – П. Лебай, прислал из Цюриха (Швейцария) статью аналогичного содержания в другой журнал раньше, 30 октября. Однако первое сообщение об идее Джиока было сделано в Американском химическом обществе от его имени еще 9 апреля 1926 г. Таким образом, здесь, как и в предыдущих двух случаях, вопрос о приоритете носит условный характер.

Идея нового, магнитного охлаждения была основана на использовании эффекта, который впоследствии был назван *магнитокалорическим*.

Чтобы понять ее, необходимо вспомнить некоторые сведения, относящиеся к магнитным свойствам веществ. Способность вещества намагничиваться в магнитном поле (т.е. самому становиться магнитом) называется *магнитной восприимчивостью*.

У разных веществ эта восприимчивость различна. Если, например, поместить между полюсами магнита железный стержень, то он намагнитится; но медный, помещенный на это же место, магнитом не станет. Вещество, обладающее магнитной восприимчивостью, называется *магнетиком*. Магнитная восприимчивость магнетиков (в частности, железа) связана с тем, что каждый из его атомов обладает свойствами некоего элементарного магнетика, поскольку электроны, вращаясь как вокруг ядра, так и вокруг своих осей, образуют свое магнитное поле. В обычных условиях, вследствие тепловых колебаний атомов, ориентация этих элементарных магнетиков бес-

¹ Интересно, что Нернст и Джиок получили премии не по физике, а по химии!

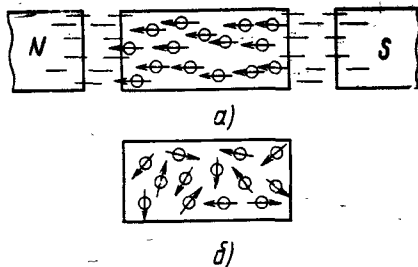


Рис. 7.3. Ориентация элементарных магнетиков:

а — упорядоченная (при наложении магнитного поля); б — хаотическая (при отсутствии магнитного поля)

порядочно; когда же вещество попадает во внешнее магнитное поле, элементарные магнетики выстраиваются по его направлению (рис. 7.3), и само вещество становится магнитом. Если внешнее магнитное поле удалить, то вещество снова размагнитится. Объясняется это тем, что тепловое движение атомов "растрясает" их, и общая ориентация атомов нарушается. Чем выше температура, тем это "растрясющее" действие больше. Наконец, есть такая температура, выше которой внешнее поле никак не может установить порядок в магнитной ориентации атомов; вещество вообще теряет магнитную восприимчивость. Такая температура называется "точкой Кюри". Ниже "точки Кюри" магнитная восприимчивость магнетика возрастает, поскольку помехи магнитному упорядочиванию от теплового движения атомов по мере снижения температуры уменьшаются (закон Кюри). Вместе с тем многие вещества не подчиняются закону Кюри. В них элементарные магнитные поля взаимодействуют между собой и не реагируют должным образом на внешнее магнитное поле, не воспринимая, так сказать, его "команду".

Но есть и вещества, парамагнетики, которые подчиняются закону Кюри до самых низких температур, даже в области 1 К и ниже. Одно из таких веществ — сульфат гадолиния¹, изученный еще при жизни Камерлинг-Оннеса. Оно было предложено Джиоком и Дебаем для использования в новом способе охлаждения. Идея его заключалась в том, чтобы осуществить обратный цикл, подобный тому, который совершается в обычной холодильной установке, но не с помощью сжатия и расширения рабочего тела, а посредством намагничивания и размагничи-

вания. Дело в том, что в процессе намагничивания при установлении порядка в ориентации атомов магнитное поле производит работу над веществом, которое, получая энергию, несколько нагревается. И напротив, когда магнитное поле снимается, разупорядочивание происходит за счет внутренней энергии тела (т.е. энергии тепловых колебаний атомов). Поэтому магнетик охлаждается. Первый процесс аналогичен в этом отношении сжатию в компрессоре, а второй — расширению в детандере. Принципиальное отличие от обычного, термомеханического способа охлаждения состоит в том, что во втором случае рабочее вещество не газ и не жидкость, а твердое тело. Это принципиально меняет способ его использования для отвода тепла. Здесь все процессы осуществляются уже не в разных устройствах (компрессоре, детандере, теплообменниках) при перемещении рабочего вещества, а в одном блоке твердого тела. Это было довольно трудно сделать, и прошло целых семь лет, пока Джиок¹ вместе с Мак-Дугаллом преодолели путь "от идеи до машины" и успешно запустили первую магнитную криогенную установку в Калифорнийском университете. В марте 1933 г., размагничивая сульфат гадолиния, Джиок получил сначала температуру 0,53 К, затем в апреле 0,34 К и наконец 0,25 К! Лейденская лаборатория, получившая к этому времени имя Камерлинг-Оннеса, тоже постаралась не отставать и через месяц получила температуру 0,27 К (используя фторид церия). Это был огромный качественный скачок, достигнутый только благодаря переходу на совершенно новый способ охлаждения. Чтобы его оценить, нужно учесть, что интервал от 0,83 (рекорда, полученного методом откачки паров гелия) до 0,25 К, т.е. всего 0,58 К, с энергетической точки зрения очень велик и гораздо больше, чем между температурами жидких водорода и гелия, т.е. 20,4 и 4,2 К.

Действительно, по формуле Карно работа, необходимая для отвода единицы тепла с низкого уровня T_0 на уровень $T_{0,c}$ окружающей среды, определяется отношением (см. § 2.2):

$$l = (T_0 - T_{0,c}) / T_0.$$

¹ П. Дебай был исключительно физиком-теоретиком и не делал попыток осуществить идею магнитного охлаждения на практике.

¹ Гадолиний — элемент № 64 таблицы Менделеева. Назван по имени открывшего минерал, содержащий его, финского химика Ю. Гадолина.

Принимая $T_0 = 293 \text{ K}$ (20°C), получаем значения l , приведенные ниже¹:

T_0, K	20,4	4,2	1,0	0,83	0,25
$l, \text{Дж/Дж}$	13,4	68,8	292	352	1171

Следовательно, чтобы отвести то же количество тепла с уровня $T_0 = 4,2 \text{ K}$, нужно затратить на $58,8 - 13,3 = 55,4 \text{ Дж}$ больше, чем при отводе тепла с уровня $T_0 = 20,4 \text{ K}$. Но для $T_0 = 0,25 \text{ K}$ и $T_0 = 0,83 \text{ K}$ получается уже разница в $1171 - 352 = 819 \text{ Дж}$. Путь вниз здесь, несмотря на малое число градусов, дороже почти в 16 раз! С приближением к 0 K значение $l \rightarrow \infty$.

Как же работает система магнитного охлаждения? На рис. 7.4 такая система схематически показана в том несколько усовершенствованном виде, который она приобрела уже после первых опытов Джиока.

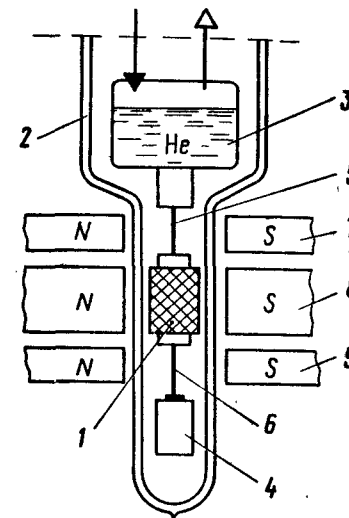
Магнитная соль помещается в средней части сосуда Дьюара. В верхней, более широкой части сосуда находится ванна с жидким гелием, температура которого (например, 1 K) поддерживается откачкой пара при соответствующем давлении. В нижней части сосуда расположена камера, в которой находится охлаждаемый объект.

Трубка с магнитной солью (например, сульфатом гадолиния) соединена наверху с гелиевой ванной полоской 5 сверхпроводящего металла и снизу другой полоской 6 с охлаждаемой камерой. Эти полоски называются "тепловыми ключами". Их действие основано на двух замечательных свойствах сверхпроводников, обнаруженных вскоре после их открытия.

Первое из них состоит в том, что металл, находящийся при температуре ниже критической, теряет сверхпроводящие свойства, если на него наложить достаточно сильное внешнее магнитное поле; однако, если поле снять, сверхпроводимость восстанавливается. Вслед за этим проявилось связанное с первым и второе свойство: металл в сверхпроводящем состоянии резко уменьшает теплопроводность, по сравнению с той, которая характерна для него, когда сверхпроводимость нарушена. Например, свинец в сверхпроводящем состоянии имеет в де-

¹ Минус перед значением l (означает, что работа затрачивается, а не получается) опущен.

Рис. 7.4. Установка для магнитного охлаждения:
1 — парамагнитная соль; 2 — сосуд Дьюара; 3 — жидкий гелий; 4 — охлаждаемый объект; 5, 6 — тепловые ключи; 7–9 — электромагниты



сятки раз меньшую теплопроводность (при тех же прочих условиях), чем в случае, когда она разрушена магнитным полем.

Эти свойства в полной мере использованы в описанной системе магнитного охлаждения. Вся она расположена между полюсами трех электромагнитов. Средний 8 предназначен для воздействия на рабочее тело — соль, верхний 7 и нижний 9 — на соответствующие тепловые ключи.

При включении магнита 8 соль нагревается. В это время включается и нижний магнит 9. При этом "размыкается" нижний тепловой ключ, и нагрев соли не может повлиять на температуру объекта охлаждения. Верхний тепловой ключ остается "открытым", и тепло от нагретой соли передается через свинцовую полоску в ванну с жидким гелием. Затем, когда температуры соли и ванны сравняются, включается верхний магнит 7, прекращая тепловой контакт между ними. Одновременно выключается магнит 8, и соль вследствие размагничивания охлаждается. После этого нижний магнит 9 выключается, и камера 4 с объектом охлаждения вступает в тепловой контакт через свинцовую полоску (тепловой ключ 6). При этом камера охлаждается до температуры холодной соли. После того как тепловое равновесие устанавливается, цикл повторяется, и т.д. В результате тепло от холодной камеры постоянно переда-

ется в гелиевую ванну, а в камере устанавливается более низкая температура, чем в ванне. Температура гелия в ванне не меняется, так как подвод тепла к нему приводит только к испарению некоторой его части, что легко восполняется.

Магнитное охлаждение можно осуществлять и в две ступени, используя верхнюю при получении более низкой исходной температуры для работы нижней. Таким путем были достигнуты низкие температуры, отстоящие от 0 К меньше, чем на 0,01 К.

Физики получили, наконец, средство, позволяющее изучать свойства веществ практически во всем диапазоне криотемператур. Исследования при этом шли в двух направлениях: изучались свойства твердых тел, главным образом в связи со сверхпроводимостью, и жидкого гелия, в котором было открыто еще одно, еще более удивительное "сверхсвойство" – сверхтекучесть. На каждом из этих двух направлений неожиданных сюрпризов было более чем достаточно.

Начнем со свойств твердых тел. После открытия сверхпроводимости ртути и свинца начались поиски и других, новых сверхпроводников. Сверхпроводимость была обнаружена сначала у олова, индия, таллия и галлия, а затем в 20-е годы у тантала, ниобия, титана, тория и др. Критические температуры у них различны, но не превышают 10 К.

Как и при всяком новом открытии, возникают два естественных желания – первое (у физиков) – найти объяснение, построив новую теорию или расширив старую, и второе (у инженеров) – использовать его для практических целей.

Г. Камерлинг-Оннес счастливо сочетал (что не так часто встречается) умение мыслить и как физик, и как инженер. Поэтому он сразу же подумал об использовании сверхпроводимости для того, чтобы создавать сильные магнитные поля, нужные для многих исследований (в особенности низкотемпературных). Обычные электромагниты с железным сердечником были громоздки и потребляли огромное количество электроэнергии, перегоняя ее в тепло, выделяющееся в обмотке. Для отвода этого тепла нужно было много охлаждающей воды. Сверхпроводящий магнит можно было бы запитать током только один раз, а эксплуатационные затраты свелись бы лишь к поддержанию уровня жидкого гелия. Но, поскольку сверхпроводящий магнит тепла не выделяет, это было бы не так сложно. Планы строились и дальше: на том же принципе можно

было бы в дальнейшем создать трансформаторы, генераторы и другие электротехнические устройства.

Однако этим мечтам тогда не суждено было осуществиться. Оказалось, что сверхпроводник выдерживает только слабые токи (а следовательно, и магнитные поля). Если его нагружать током, превышающим определенное для каждой температуры значение, сверхпроводимость исчезает! Все многократные попытки получить практически пригодный сверхпроводящий магнит не увенчались успехом. На смену радужному оптимизму по поводу будущих сверхпроводящих устройств пришел почти черный пессимизм.

Тем не менее исследования сверхпроводников и других твердых тел при низких температурах продолжались и в Лейдене, и в новых центрах – Оксфорде, Кембридже, Торонто и Берлине.

Через некоторое время к числу этих лабораторий присоединились и советские – сначала в Харькове (Украинской физико-технологический институт – УФТИ), а затем и в Москве (институт физических проблем – ИФП).

7.2. СТАНОВЛЕНИЕ И ТРУДНЫЕ ПУТИ СОВЕТСКОЙ КРИОГЕНИКИ

В отличие от других европейских стран, где низкотемпературная наука и техника имели давние традиции, в России со времен Ломоносова никто этими вопросами не занимался. Холодильная техника базировалась на импортном оборудовании, а производство отечественных машин только начиналось, и то по иностранным образцам. Что касается криогеники, то попытка проф. Н. А. Умова развить это направление в Московском университете не привела к успеху.

Однако начиная с 20-х годов криогеника в Советском Союзе начала развиваться настолько быстро, что за несколько лет вышла на самые передовые рубежи и дала мировой науке таких "трех китов", как Л. В. Шубников, Л. Д. Ландау и П. Л. Капица.

При этом сказались одновременное и взаимосвязанное действие двух факторов.

Первый из них – революция. При всех ее издержках, в значительной степени неизбежных, она дала мощный импульс тем направлениям науки, которые содействовали развитию

производительных сил страны, и открыла перед ее деятелями новые возможности¹; с философами дело было хуже.

В противоборстве двух тенденций – недоверия и даже вражды к "буржуазной" научно-технической интеллигенции и противоположной – стремлении привлечь ее на свою сторону и дать развернуть свои возможности, победила вторая. Решающую роль здесь сыграл В.И. Ленин. Уже в январе 1918 г. он поручил А.В. Луначарскому начать переговоры с Академией наук. При этом он предупредил, что здесь нужен большой такт и осторожность. "Найдется у Вас какой-нибудь "смельчак", наскочит на Академию и перебьет там столько посуды, что потом с Вас придется строго взыскивать".

При жизни Ленина и в 20-е годы это предупреждение действовало.

В проведении этой политики пришлось преодолеть сопротивление некоторых ответственных партийных работников, и это неуклонно делалось.

С 1918 по 1923 г. была открыта и начала работу целая сеть новых научно-исследовательских институтов и лабораторий: Государственный оптический институт, Радиевый институт, Институт прикладной химии, Московская горная академия, Институт физико-химического анализа, Нижегородская радиотехническая лаборатория и Нижегородский университет, Физико-технический институт и др.

Последний, руководимый А.Ф. Иоффе, в дальнейшем и стал базой, обеспечившей развитие криогеники в нашей стране.

Вторым фактором, способствовавшим быстрому росту науки в Советской России, было международное научное сотрудничество. Со стороны правительства оно всячески поощрялось, как в форме широкого использования иностранной научной

¹ Интересно отметить аналогию: Великая французская революция тоже "дала ход" науке и научному образованию. Стоит вспомнить реорганизацию научных институтов и деятельность Монжа, Бертолле, Л. Карно, Лагранжа, Лапласа...

Вместе с тем, разумеется, нельзя забывать и о таких событиях, как казнь А. Лавуазье, и особенно о словах, сказанных председателем трибунала во время суда над ним: "Революция не нуждается в химиках". Были и у нас подобные "революционные" деятели. Один из них, столь же дальновидный, как и его французский предшественник, сказал такую же фразу знаменитому авиаконструктору Сикорскому: "Революция не нуждается в самолетах". Сикорский, создатель первых в мире крупных самолетов, эмигрировал в США.

литературы, так и непосредственными личными контактами и совместными работами.

В июне 1921 г. по инициативе В.И. Ленина был организован Комитет иностранной литературы (КОМИНОЛИТ) во главе с О.Ю. Шмидтом, на который была возложена задача приобретения за границей литературы по всем отраслям знаний.

В октябре этого же года Ленин писал в КОМИНОЛИТ, поставив задачу добиться, чтобы "в Москве, Петрограде и крупных городах Республики было сосредоточено в специальных библиотеках по экземпляру всех заграничных новейших научных (химия, физика, электротехника, медицина, статистика, экономика и проч.) журналов и книг 1913–1921 гг. и было бы налажено регулярное получение всех периодических изданий".

Возобновлялись и личные контакты, в том числе и путем командирования за границу научных работников и инженеров.

Известные деятели науки Запада активно поддерживали эти начинания. Характерно, например, письмо А. Эйнштейна, помещенное в "Известиях" от 21 января 1921 г.: "От наших товарищей я узнал, что русские товарищи даже при настоящих условиях заняты усиленной научной работой. Я вполне убежден, что пойти навстречу русским коллегам – приятный и святой долг всех ученых, поставленных в более благоприятные условия, и что последними будет сделано все, что в их силах, дабы восстановить международную связь. Приветствую сердечно русских товарищей и обещаю сделать все от меня зависящее для налаживания и сохранения связи между здешними и русскими работниками науки".

Такие связи "русских и европейских Архимедов", по выражению В.И. Ленина, действительно стали быстро налаживаться.

Об атмосфере, существовавшей в это время, Ч. Сноу в известной книге "Две культуры" писал: "Мир науки 20-х годов был настолько близок к идеальному интернациональному обществу, насколько это возможно... Научная атмосфера 20-х годов была насыщена доброжелательностью и великодушием; люди, которые в нее окунались, невольно становились лучше".

Одними из первых европейских научных коллективов, в которых начали работать молодые исследователи из Советской России, были знаменитая криогенная лаборатория Камерлинг-Оппенса в Лейдене и лаборатория Резерфорда в Кембриджском университете.



Рис. 7.5. Лев Васильевич Шубников

В первой находилась группа, в которую входили Л.В. Шубников и Л.Д. Ландау, во второй – П.Л. Капица.

В 1926 г. де Хаас обратился к А.Ф. Иоффе с просьбой прислать ему в помощь молодого русского физика, имеющего опыт получения особо чистых образцов металлов для низкотемпературных исследований.

В результате появилось письмо А.Ф. Иоффе заведующему Главной М.П. Кристи. Приведем отрывки из этого письма: "Очень прошу Вашей помощи в деле освобождения от воинской повинности ст. ассистента ГФТИ Льва Васильевича Шубни-

кова... Я предполагаю командировать ... в лабораторию Камерлинг-Оннеса. Тов. Л.В. Шубников приглашается проф. де Хаасом... По возвращению оттуда Л.В. Шубников должен устраивать криогенику у нас в институте".

Это ходатайство было удовлетворено и имело впоследствии результаты, даже превзошедшие надежды А. Иоффе, – Л.В. Шубников не только организовал "устройство криогеники", но и создал первый советский крупный центр и на его базе школу криогеники мирового уровня.

Л.В. Шубников родился в Петербурге в 1901 г. Осенью 1918 г. он поступил на впервые открытое математическое отделение физико-математического факультета Петроградского университета. Поскольку он был единственным студентом этого отделения набора 1918 г., ему приходилось для слушания лекций присоединяться к студентам других отделений. В 1922 г. он перешел в Политехнический институт; одновременно с учебной работой лаборантом и принимал активное участие в научных исследованиях. В частности, он хорошо овладел методикой получения особо чистых металлов. К моменту окончания института он уже был подготовлен для самостоятельной работы.

Именно поэтому А. Ф. Иоффе рекомендовал его для командирования в Лейден.

В Лаборатории Камерлинг-Оннеса Шубников, а затем еще группа молодых советских исследователей, прибывшая вслед

за ним¹, быстро освоились и включились в работу. Большую помощь им оказал замечательный физик П. Эренфест, работавший в то время в Лейденском университете. До этого он провел несколько лет в России в качестве преподавателя Политехнического института (1907–1912 гг.), где его называли даже Павлом Сигизмундовичем. Он знал русский язык. (Его жена Т.А. Афанасьева-Эренфест – тоже известный физик).

П. Эренфест обладал широчайшим научным кругозором и хорошо понимал проблемы физики низких температур. В Лейденских семинарах П. Эренфеста участвовали такие деятели, как А. Эйнштейн, М. Планк, М. Борн, Э. Шредингер, П. Дирак и другие – практически весь "цвет" физики того времени. В Лейден приезжали из Советского Союза А. Ф. Иоффе, И. Е. Тамм, Л. Ландау; посещал Лейден и работавший в то время в Кембридже П. Л. Капица. Лучшие условия для формирования молодых научных работников трудно себе представить. Здесь царствовала та атмосфера доброжелательства и увлечения наукой, о которой писал Ч. Сноу. Заслуги Эренфеста перед русской наукой были отмечены: в 1924 г. он был избран иностранным членом АН СССР.

Первой работой Шубникова в лаборатории Камерлинг-Оннеса было исследование электросопротивления висмута в магнитном поле, в результате которого был установлен "эффект Шубникова – де Хааса". За этой работой последовал и ряд других.

В Лейдене Шубников стал первоклассным криофизиком мирового уровня. В 1929 г. он вернулся на родину, поселился в Харькове и приступил к работе в организованном на несколько месяцев раньше УФТИ. По мысли Иоффе, уже здесь, в Харькове, а не в Ленинграде нужно было создать криогенную лабораторию. После ряда организационных неполадок этот вопрос был решен, и в 1931 г. руководителем этой лаборатории был назначен Шубников. Его мечтой было создать современную базу для собственной криогеники и организовать творческий коллектив, способный вывести ее на международный уровень. И он взялся за ее реализацию, делая буквально чудеса. Начинать нужно было с собственной базы для получения ожиженных газов – без них никакая экспериментальная работа не могла проводиться. В то время взять жидкий водород или гелий было негде.

¹ В Лейдене тогда была большая группа стажеров из Советского Союза.

Уже в 1931 г. был запущен крупный по тому времени водородный ожигатель УФТИ производительностью 12 л/ч. В 1932 г. был введен в строй небольшой гелиевый ожигатель Симона, а в 1935 г. большой – Мейснера, дававший 1,5 л/ч. Было также налажено производство металлических сосудов Льюара и вакуумной аппаратуры.

Сделать все это за столь короткий срок практически на пустом месте было бы невозможно, если бы не помощь как "изнутри", так и "извне". Первая оказывалась в основном Орджоникидзе, продвигавшим по "зеленой улице" заказы лаборатории, вторая – друзьями из Лейдена – де Хаасом, Кеезомом и другими, которые бескорыстно, без всякой оплаты присылали и привозили сами материалы, приборы и другое оборудование.

В лаборатории наряду с молодыми советскими специалистами (в том числе и теми, которые прошли школу Лейдена) работали и зарубежные, в частности бежавшие из Германии от гитлеровцев. Работы шли в двух направлениях: физика конденсированного состояния (т.е. свойства жидких и твердых тел) при низких температурах и криогенная техника – промышленное ожигение газов и разделение газовых смесей (воздуха для получения азота и кислорода, природного газа для получения гелия и др.). Второе направление развивалось в специальной промышленной лаборатории Опытной станции глубокого охлаждения (ОСГО), созданной в 1935 г.

Летом того же года Шубников стал заведующим кафедрой физики твердого тела в Харьковском университете (здесь он организовал первый в стране криогенный студенческий практикум). В это же время его друг Ландау стал заведующим кафедрой общей физики. (Их часто видели вместе и, чтобы проще различать, прозвали: "Лев толстый" – Шубников и "Лев тонкий" – Ландау.)

К этому времени Харьковская школа криогеники уже выдвинула ряд работ международного класса и, догнав своих учителей, стала в один ряд с ведущими мировыми криоцентрами. Так же как и в Лейдене, проводились научные семинары с привлечением как советских, так и иностранных участников. Активно работал в них и "Лев тонкий" – Ландау.

Были продолжены работы, связанные с "эффектом Шубникова – де Хааса"; Шубников и Рябинин изучали проникновение магнитного поля в сверхпроводники; был независимо от Мейс-

нера (на несколько месяцев позже) установлен эффект в сверхпроводниках, получивший в дальнейшем название "эффекта Мейснера". В 1936 г. была открыта так называемая "фаза Шубникова" в сверхпроводниках. Эти работы, наряду с проводившимися в зарубежных лабораториях, подготовили базу для нового рынка в теории и практике сверхпроводимости в 40-е и последующие годы.

Работы Мейснера, Шубникова и других показали, что взаимодействие магнитного поля со сверхпроводником – явление сложное. Поле проникает в сверхпроводник не сразу, оно "выталкивается" из сверхпроводника, задерживаясь на небольшой глубине. Только достигнув определенного значения, оно прорывается внутрь и разрушает сверхпроводимость. В дальнейшем оказалось, что в некоторых сплавах, в отличие от чистых металлов, сопротивление этому проникновению очень велико, и они (так называемые "сверхпроводники II рода") могут выдерживать большие токи и создавать мощные магнитные поля без разрушения сверхпроводимости при температурах до 20–24 К. Мечта Камерлинг-Оннеса все же, вопреки прогнозам скептиков, реализовалась, но это было уже намного позже, в 50-е годы. О том, что дало на практике использование таких сверхпроводников, рассказывается в § 7.3.

Инженерные работы в ОСГО тоже развивались не менее интенсивно, чем у физиков, и в тесном контакте с ними. Л. В. Шубников успевал заниматься и инженерными вопросами. Особенно продвинулись работы со сжиженными газами. В 1936 г., намного опережая развитие техники своего времени, сотрудники ОСГО успешно применили жидкий метан в качестве горючего для двигателей внутреннего сгорания. В 1937 г. были доведены до практического применения устройства для резки и сварки металлов на базе жидкого кислорода и на той же базе – системы для обеспечения дыхания экипажей высотных самолетов при длительных полетах. В рекордных полетах экипажей Громова и Гризодубовой эти системы прошли успешную практическую проверку.

Были намечены и новые работы, нацеленные на будущее, – исследования сверхпроводников, жидкого гелия, установок разделения газовых смесей и др.

Наступали, однако, другие времена. Верх взяли тенденции тех самых "смелчаков" – специалистов по "битью посуды", от которых предостерегал в свое время Ленин. Они, по сущест-



Рис. 7.6. Петр Леонидович Капица

ву, преследуя интеллигенцию, исходили из лозунга "Революция не нуждается в химиках", хотя и провозгласили вслух борьбу в защиту науки от буржуазного влияния, вредительства и шпионажа. Началось это в конце 20-х годов и в середине 30-х годов докатилось до УФИ и Харьковского университета.

В 1936 г. Шубников получил персональное приглашение на VII Международный конгресс холода в Гаагу, но выезд туда не разрешили. В этом же году в Союз не смогли приехать из Лейдена В. де Хаас и Э. Вирсма, которые везли очередные научные новости и подарки для лаборатории. В конце 1936 г. из Харьковского университета уволили Л. Ландау.

Последним светлым эпизодом в жизни Шубникова была выездная сессия физической группы АН СССР в Харькове, которая дала очень высокую оценку работам криогенной лаборатории УФИ и ОСГО.

После этого Шубников вместе с Ландау уехали в отпуск: 6 августа, после возвращения, Шубников был арестован и осужден "на 10 лет без права переписки" (расстрелян 8 ноября 1937 г.; в 1957 г. посмертно реабилитирован).

Немного спустя подверглись аресту и несколько других ведущих сотрудников; работа лаборатории была практически сорвана. Только к 1940–1941 гг. удалось понемногу наладить работу, но тут началась война...

Уцелевшие криогеники – ученики и сотрудники Шубникова, продолжали работу в различных научных организациях и на производстве. Многие из них во время и после войны стали ведущими специалистами, распространяя опыт и традиции "харьковской школы". Несколько человек, во главе с Л. Л. Ландау, переехали в Москву, где к этому времени П. Л. Капица создал новый центр притяжения для тех, кто занимался криогеникой, – Институт физических проблем.

П. Л. Капица родился в Петербурге в 1894 г. и прошел (несколько раньше) ту же школу, что и Шубников, – Петроградский политехнический институт.

В 1921 г. А. Ф. Иоффе включает П. Л. Капицу (который в это время был уже доцентом) в комиссию Академии наук, которая направляется в Европу для восстановления научных связей, а также закупки научного оборудования и литературы. В Кембридже Иоффе обращается к самому Резерфорду – физику с мировой славой – с просьбой принять Капицу на стажировку в знаменитую Кавендишскую лабораторию¹. После некоторых колебаний, связанных с опасениями, что новый сотрудник внесет "большевистский дух" в уважаемый Кембридж. Резерфорд все же согласился взять Капицу в свою лабораторию и впоследствии не жалел об этом. П. Л. Капица проработал в Кембридже 13 лет – намного больше, чем Шубников в Лейдене, и успел сделать за это время очень многое. Начал работу он, по собственному выражению, "с остервенением".

Работы Капицы велись в двух основных направлениях: первое – создание и использование сильных магнитных полей, второе – криогенная техника. Прежде чем рассказать о его достижениях по непосредственно относящемуся к теме этой книги второму направлению, уделим некоторое внимание тому, как развивалась карьера Капицы в Кембридже. Краткий ее очерк дал П. Е. Рубинин [10].

1923 г. – Получил стипендию имени Максвелла. Защитил диссертацию на степень доктора философии Кембриджского университета.

1925 г. – Назначен заместителем директора Кавендишской лаборатории по магнитным исследованиям. Избран членом Тринити-колледжа.

1926 г. – Торжественное открытие Магнитной лаборатории П. Л. Капицы при Кавендишской лаборатории. В церемонии принял участие тогдашний канцлер Кембриджского университета, бывший премьер лорд Бальфур.

1929 г. – Избран действительным членом Лондонского Королевского общества. В этом же году и АН СССР избирает П. Л. Капицу членом-корреспондентом.

¹ Она названа в честь великого Кавендиша – того самого, среди многочисленных работ которого было открытие задолго до Рэлея и Рамзая инертных газов в воздухе (см. гл. 6).

1930 г. – Назначен профессором-исследователем Лондонского Королевского общества и директором новой Мондовской¹ лаборатории, созданной специально для работ Капицы в области сильных магнитных полей и низких температур. Средства для этого выделило Королевское общество.

На торжественной церемонии Мондовскую лабораторию "принимал" канцлер Кембриджского университета Стэнли Болдуин трижды премьер-министр – в 1923, 1924–1929 и 1935–1937 гг.). В своей речи, которая может служить образцом того, как государственный деятель должен относиться к науке и к тем, кто ее создает, он сказал: "Это событие чрезвычайной важности. В наше время положение стран зависит не только от ее вооруженных сил и развития ее промышленности, но и от ее завоеваний науки. Мы счастливы, что у нас директором лаборатории работает проф. Капица, так блестяще сочетающий в своем лице и физика и инженера. Открытие этой лаборатории является предзнаменованием того, что Англия сможет снова занять ранее принадлежавшую ей ведущую роль в этой важнейшей области научных исследований".

Вся Англия и ее доминионы узнали из печати все подробности церемонии открытия по статьям и фотографиям. Советским читателям об этом событии рассказал журнал "Огонек".

Не следует думать, что за всеми этими событиями Капица забывал о своей стране. Он помогал советским научным работникам получать стипендии и проходить стажировку в ведущих научных центрах Европы, в том числе в Кавендишской лаборатории, и поддерживал связи с советскими научными учреждениями.

В августе 1934 г., как и раньше, Капица поехал на родину, чтобы повидать близких и друзей и посетить УФТИ и его криогенную лабораторию, консультантом которых он был с 1929 г.

В начале сентября он участвовал в Ленинграде в Международном конгрессе, посвященном 100-летию со дня рождения Д. И. Менделеева. А в конце сентября он узнал, что в Англию его больше не пустят... Вся годами налаженная работа обр-

¹ Людвиг Монд – химик и промышленник, завещавший Королевскому обществу большую сумму на развитие науки. Из нее и были взяты 15 тыс. фунтов стерлингов для строительства лаборатории.

валась. Мондовская лаборатория оставалась без директора, а Капица – без лаборатории. Сделать что-либо, чтобы изменить это решение, продиктованное "сверху", было абсолютно невозможно.

П. Л. Капица оказался в очень тяжелом положении, на грани нервного срыва. Он намеревался осенью, после возвращения в Кембридж, приступить к серии опытов по исследованию жидкого гелия. Весной этого года был пущен созданный под его руководством новый оживитель гелия, и все, что было нужно для работы, было подготовлено. Сначала он пытался передать в письмах советы и указания своим помощникам, но понял, что это руководство на расстоянии бесперспективно.

В конце концов при содействии Академии наук и ряда академиков, в том числе И. П. Павлова, и с помощью усилий самого Капицы было принято решение создать в Советском Союзе институт, в котором он мог бы продолжить и развить свои работы. Большую помощь в этом деле оказал В. И. Межлаук, который был в это время заместителем председателя Совнаркома СССР и председателем Госплана. В круг его обязанностей входило и курирование науки¹. В декабре 1934 г. состоялось решение Совнаркома СССР о строительстве в Москве Института физических проблем. Поддержал Капицу и Резерфорд, согласившийся продать в Советский Союз часть оборудования Мондовской лаборатории, чтобы дать возможность начать работы в ИФП как можно раньше. Эту жертву мог принести только человек, который, по выражению Капицы, был ему "как отец родной".

При такой поддержке, несмотря на все препятствия, ИФП был построен в небывало короткий срок, к декабрю 1935 года.

К числу препятствий, которые пришлось преодолевать Капице в это время (и в дальнейшем), относилась борьба с самыми разнообразными проявлениями бюрократии, в частности с почтением к внешней форме. При этом даже научный авторитет и чувство юмора не всегда помогали (а второе иногда и мешало).

¹ В. И. Межлаук (1893–1938 гг.) – государственный и партийный деятель (в революционном движении с 1907 г.), сохранивший еще ленинские традиции в отношении к науке и ее деятелям. Был репрессирован. О том, каков был этот человек, видно из того, что уже находясь в тюрьме, он написал труд "О плановой работе и методах ее улучшения". Посмертно реабилитирован.

Приведем отрывки из писем Капицы жене, где он касается этой темы.

"То, что в Англии решается одним телефонным звонком, здесь требует сотни бумаг. Тебе на слово ничему не верят, верят только бумаге, недаром она дефицитна. Бюрократия душит всех. Душит она и Валерия Ивановича [Межлаука], который часто сам бессилён; его распоряжения разбиваются, и изничтожаются в бумажных потоках".

"...Тут люди веселости не любят. Я уверен, что они были бы в восторге, если бы я отпустил себе бороду, мычал важные слова и величаво поглядывал бы направо и налево. Одним словом, выглядел бы, как мудрец, философ и ученый так, как их принято представлять в театре..."

"...Разыгрывают из себя жрецов, вроде того, который поет так свирепо и важно, как в "Аиде". И никто бы не огорчился, если бы Академия наук была бы превращена в храм, а мы – в священников. Но вот я-то "попом" как раз быть и не могу по натуре, у меня все против этого. И я еще не так им наозорничаю, чтобы они бросили этот мистический подход к ученым. Наука должна быть веселая, увлекательная и простая. Таковыми же должны быть ученые".

П. Л. Капице и его новым помощникам пришлось преодолеть еще много трудностей самого различного характера – и организационных, и снабженческих, и финансовых. Но в конце концов ему удалось отстоять такую "бюрократическую" структуру института, которая давала возможности работать "весело, увлекательно и просто". Была сформирована основная группа научных сотрудников и опытных мастеров. С марта 1937 г. в институте начал работать Л. Д. Ландау. И первой задачей, которой занялись в институте, было изучение свойств жидкого гелия. К началу 1937 г. оживитель гелия был запущен и заработал. Можно было начинать путешествие хотя и не в новую (исследователи там уже побывали), но все же полную загадок область, расположенную ниже 3 К.

7.3. ПАРАДОКСЫ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

К тому времени, когда Капица со своими сотрудниками приступили к работам по исследованию жидкого гелия (1937 г.), уже накопилось множество фактов, свидетельствующих о его необычных и во многом загадочных свойствах.

Только одна из таких загадок – нежелание жидкого гелия даже в области около абсолютного нуля температур переходить в твердое состояние – была решена. Гелий все же заставили затвердеть. Произошло это в лаборатории Камерлинг-Оннеса уже после смерти ее основателя, которому так и не удалось увидеть твердый гелий. Но и при этом гелий оказался "не таким, как все другие вещества". Никакое охлаждение так и не заставило его перейти в твердое состояние. Казалось бы, что силы сцепления его атомов, как бы малы они ни были, смогут при почти полном прекращении теплового движения закрепить их, чтобы гелий затвердел. Ф. Симон показал, что дело здесь в энергии так называемых "нулевых колебаний" атомов, существующей даже при $T \rightarrow 0$ К и предсказываемой квантовой теорией. Эта энергия нулевых колебаний достаточна для того, чтобы преодолеть очень малые силы сцепления атомов гелия. Надо было только помочь им сблизиться и закрепиться. Только внешнее давление могло этому помочь. И действительно, при повышении давления до 2,5 МПа гелий все же сделался твердым.

Своим необычным поведением он превзошел даже воду – другую удивительную жидкость, у которой лед не только менее плотен, чем вода, но и существует в пяти разных модификациях.

"Гелиевый" лед имеет уникальную особенность – он может плавиться, если его нагреть или уменьшить давление, под которым он находится, но испаряться, как все другие, в принципе не может. Это видно по его фазовой диаграмме, представленной на рис. 7.7, а. На рис. 7.7, б дана диаграмма для обычной жидкости, аналогичная той, которая была показана на рис. 2.7.

Видно, что гелиевая диаграмма как бы ограничена частью обычной диаграммы, отделенной штриховыми линиями; для гелия область, лежащая под ней, не существует.

Другие загадки жидкого гелия так или иначе связаны с явлениями, которые происходят, когда при охлаждении он переходит линию ab (рис. 7.7, а). При давлении 0,1 МПа это соответствует температуре около 2,19 К. Еще в 1911 г. Камерлинг-Оннес заметил, что вязкость гелия проходит в этой точке через максимум, а в 1924 г. он, проведя точные измерения, заметил, что зависимость теплоемкости от температуры носит такой же характер, но имеет в этой точке острый пик, напоминающий

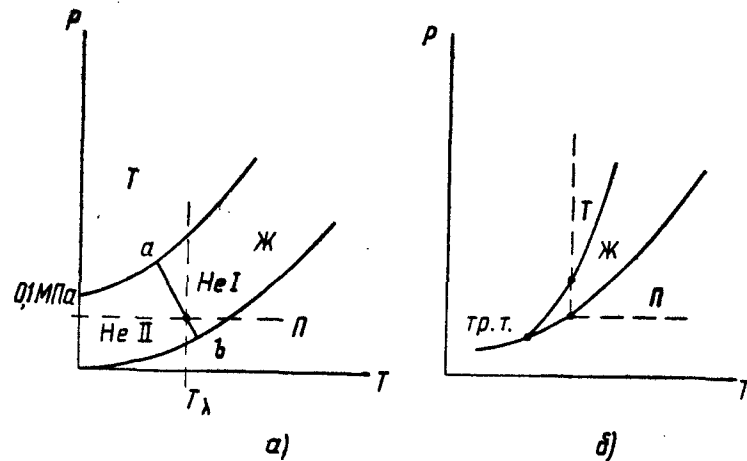


Рис. 7.7. Фазовая диаграмма гелия (а) и фазовая диаграмма обычного вещества (б):

ab — линия разделения областей жидкого гелия (He I и He II); T, Ж, П — соответственно твердая, жидкая и паровая фазы; тр.т. — тройная точка

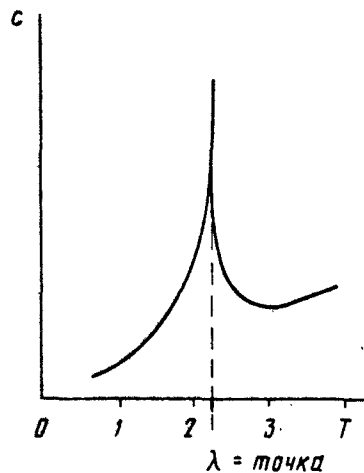


Рис. 7.8. Изменение теплоемкости с жидкого гелия в области λ -точки

по форме греческую букву λ . Более подробно исследовал это явление уже в 1930 г. Х.Кеезом совместно с Р.Клузисом. Х.Кеезом и ввел термин "температура λ -точки" (или просто " λ -точка").

В первой половине 30-х годов стало очевидно, что ниже этой точки с гелием, который при всех своих особенностях все же до нее вел себя как "добропорядочная жидкость", начинаются непонятные и странные вещи; он настолько меняет свойства, что совершенно преобразуется. Поэтому гелий в состоянии, когда его температура ниже T_λ , был назван "гелием II", а при $T > T_\lambda$ — "гелием I". Все силы исследователей сосредоточились на He II. Открытия появлялись одно за другим, благо жидкий гелий к этому времени был уже в достаточном количестве не только в Лейдене, но и в Торонто (Канада), Берлине, Бреслау (в настоящее время Вроцлав), Кембридже, а также Харькове (ФТИ) и Москве (ИФП).

Если говорить об особенностях He II, то нужно, по-видимому, сначала вернуться к тому его свойству, которое тоже заметил еще Камерлинг-Оннес. При температуре выше 2,19 К гелий кипит так же, как и любая другая жидкость, с образованием пузырьков пара, всплывающих на поверхность. Ниже λ -точки гелий ведет себя как "мертвая вода" в сказке: никаких пузырьков не образуется, и поверхность жидкости остается гладкой и неподвижной. Объяснить это удалось позже, когда были обнаружены и другие свойства гелия II, не столь очевидные.

Х.Кеезом со своей дочерью Анной провели серию опытов по измерению теплопроводности He II. Но она неожиданно оказалась настолько большой, что приборами, которыми они располагали, ее измерить не удалось. Было только очевидно, что теплопроводность невероятно велика. Точные цифры были установлены позже в Кембридже; оказалось, что теплопроводность He II больше, чем у самых теплопроводных металлов (меди и серебра) в миллионы раз!

По аналогии с электрической сверхпроводимостью Кеезом назвал это явление **сверхтеплопроводностью**.

Однако этим список новых "сверхявлений" не закончился. В ряде лабораторий были замечены и другие странности в поведении He II. Он, например, забираясь вверх по его стенкам, все время пытался "убежать" из сосуда, в котором находился, и проникал даже через уплотнения. Наиболее интересный опыт, демонстрирующий это явление, был поставлен в Оксфорде Мендельсоном и Даунтом. В сосуде с жидким He II был подвешен небольшой стеклянный стаканчик, положение которого по высоте можно было менять так, как это показано на рис. 7.9.

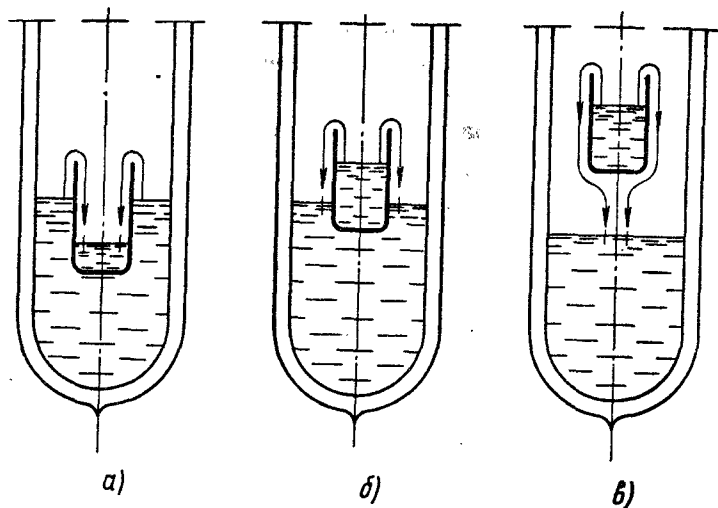


Рис. 7.9. Опыт с перетеканием He II по стенкам стаканчика в сосуде с жидким гелием

Когда стаканчик погружен в гелий (рис. 7.9, а), жидкость поднималась по наружным стенкам и переливалась внутрь до тех пор, пока уровни в стаканчике и сосуде не уравнивались. Если же стаканчик поднять выше (рис. 7.9, б), то процесс таким же удивительным путем шел в обратном направлении: жидкость по стенкам переливалась в обратном направлении тоже до тех пор, пока не достигалось совпадение уровней. Наконец, если стакан был поднят так, что полностью выходил из жидкости (рис. 7.9, в), гелий вытекал из него по стенкам тем же путем, собираясь в центре дна, и по каплям стекал в ванну до тех пор, пока не переходил в нее полностью. Еще более интересно, что опорожнение и наполнение стакана всегда шли с одинаковой скоростью, независимо от разности уровней. Если бы так себя вела вода в ведре, поднимаемом из колодца, то она бы вытекала из совершенно целого ведра так же, как и из дырявого; за время подъема она могла бы полностью стечь обратно в колодец по стенкам ведра!

Было, наконец, известно, что у He II очень малая вязкость — намного меньше, чем у He I , который является очень текучей жидкостью.

П. Л. Капица, занявшись жидким гелием, обратил внимание на то, что наличие у He II одновременно сверхтеплопроводности и малой вязкости содержит в себе некоторое противоречие с принятыми объяснениями этих явлений. Действительно, вязкость объясняется тем, что относительное скольжение слоев жидкости происходит с трением — их атомы вследствие взаимодействия препятствуют этому движению. Чем больше такое взаимодействие, тем сильнее внутреннее трение и тем больше вязкость жидкости. Но теплопроводность — это тоже взаимодействие атомов, их способность передавать от одних к другим колебательное тепловое движение, т.е. энергию в форме тепла от более нагретых участков тела к менее нагретым. Следовательно, теплопроводность тем больше, чем меньше расстояние между атомами, т.е. чем плотнее тело. Выходит, что и вязкость, и теплопроводность связаны со взаимодействием молекул сходным образом: если увеличивается теплопроводность, то должна увеличиваться и вязкость.

Но в He II все происходит наоборот: теплопроводность его колоссально возрастает, а вязкость, напротив, падает. Получается явное противоречие, и именно с его раскрытия начались знаменитые исследования Капицы.

П. Л. Капица выдвинул положение, что той громадной теплопроводности He II , которую наблюдал и измерил Кеезом, на самом деле нет, т.е. теплопередача есть, но она идет не путем теплопроводности, а совсем иначе — конвекцией. Напомним, что конвекция — это перенос энергии не путем теплопроводности, а движущимся потоком газа или жидкости. Типичным примером конвекции может служить нагревание воды в чайнике или кастрюле. Оно, как известно, ведется снизу; нагретая вода, поднимаясь вверх, переносит энергию, а вытесняемая холодная вода идет вниз, где тоже нагревается. Такая циркуляция (конвективные токи жидкости) и обеспечивает конвективный, с потоком вещества теплоперенос.

Если же греть воду сверху, рассчитывая только на теплопроводность, то тепло доберется до нижних ее слоев очень нескоро. И наоборот, охлаждать воду нужно сверху. Тогда холодная, более тяжелая вода будет идти вниз, и придонные слои тоже быстро охладятся вследствие конвекции.

Расчеты показали, что объяснить теплопередачу не сверхтеплопроводностью He II , а конвекцией трудно: для этого его вязкость должна быть крайне мала. Иначе конвекция не

будет столь интенсивной, как наблюдаемая. Но измерения вязкости He II , проведенные в Канаде (Торонто), показали, что она гораздо больше, чем вычисленная по модели Капицы. Чтобы снять это и другие противоречия и дать физикам-теоретикам основу для построения соответствующей теории, Капица и его помощники подготовили и провели ряд остроумных и трудно-выполнимых экспериментов с He II .

Начали с измерения вязкости. Ее очень трудно правильно измерить даже при обычных температурах – мешает перемешивание жидкости (турбулизация), которое увеличивает сопротивление и показывает, следовательно, завышенную вязкость. Чтобы избежать этого, нужно пропускать жидкость через очень узкую щель. Был создан вискозиметр (прибор для измерения вязкости) со щелью размером $0,5 \text{ мк}$ ($0,0005 \text{ мм}$), который мог надежно работать на гелиевом уровне.

Измерения показали, что идея Капицы была верной. Вязкость He II оказалась по крайней мере в 1000 раз меньше, чем измеренная экспериментаторами раньше. Оправдалось изречение А. П. Чехова "Человеков ловят на противоречиях".

Но и это значение вязкости, если учесть все же возможную турбулентность, было завышенным. Поэтому Капица предположил, что He II вообще лишен вязкости и представляет собой идеальную жидкость, трение между слоями которой отсутствует вообще. По аналогии со сверхпроводимостью он назвал это свойство *сверхтекучестью*. Тогда так называемая "сверхтеплопроводность" становится лишь следствием сверхтекучести; тепло переносится в He II не теплопроводностью, а конвекцией.

Далее последовала целая серия новых экспериментов. Было показано точными измерениями, что истинная теплопроводность He II примерно такая же, как и у жидкого He I , т.е. примерно в 100 000 раз меньше, чем у меди. Таким образом, было окончательно подтверждено предположение, что сверхтеплопроводности как таковой нет, а все дело в сверхтекучести.

Но самый парадоксальный эффект был получен при дальнейших опытах со сверхтекучим гелием. Исследование началось с того, что было создано устройство, позволяющее получить поток He II и изучить его поведение как при течении в трубе, так и при выходе струи из нее в ванну с гелием. Было создано устройство, схема которого в двух вариантах показана на рис. 7.10. В сосуде 2, помещенном в ванну 1 со сверхтекучим гелием, помещен электронагреватель 3 (рис. 7.10, а). При

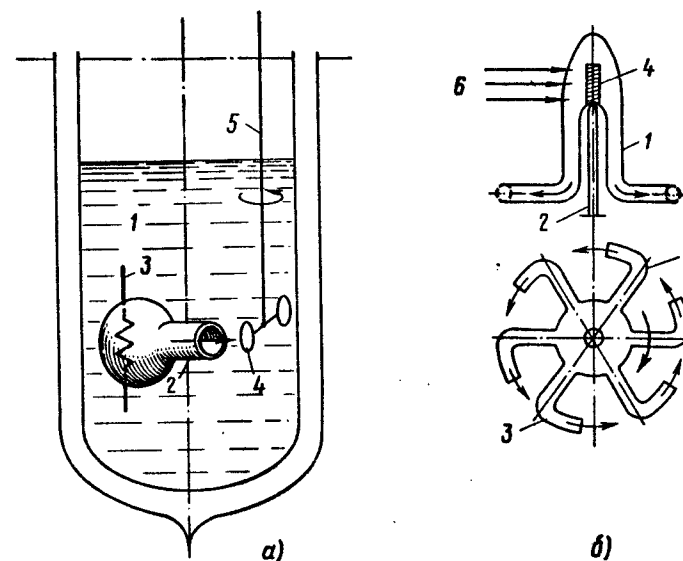


Рис. 7.10. Опыты с однонаправленным течением жидкого He II :

а, б – вытекание при нагреве из нагреваемой колбочки и реактивной турбинки

его включения происходит нагрев жидкого гелия, находящегося в колбочке, и часть его вытекает наружу через горловину сосуда 2. Образующаяся струя давит на диск 4, подвешенный на нити 5 так, чтобы струя попадала на него, поворачивая его на некоторый угол.

Однако диск 4 показывал только действие струи, вытекающей из горловины колбочки. Никакие его перемещения не показывали наличия какого-либо потока, вытекающего в колбочку. Получалась совершенно непонятная картина – гелий постоянно, в течение неограниченного времени вытекал из колбочки как из сказочного рога изобилия, но не втекал в нее!

Очень красиво это явление демонстрировал опыт с реактивной турбинкой ("паучком") (рис. 7.10, б). Стекланный "паучок", насаженный на вертикальную иглу 2, был погружен в жидкий He II . Кончики 3 его "лапок", загнутые под прямым углом, имели отверстия на концах. Через них он, при погружении в ванну, заполнялся жидким гелием. В центральной его части 4 внутренняя поверхность была зачернена. Если освещать это место

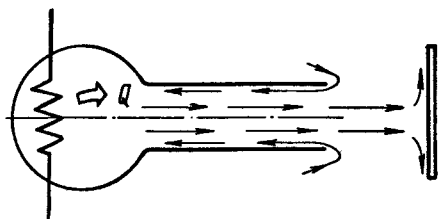


Рис. 7.11. Схема первоначального объяснения опытов, показанных на рис. 7.10

пучком света δ (т.е. нагревать), то тепло будет передаваться гелию так же, как в опыте с нагреваемой колбочкой. В результате нагрева гелия происходит то же самое, что и в предыдущем опыте: гелий непрерывно вытекает, но не из одного отверстия, а из кончиков всех "лапок паучка". Это видно потому, что "паучок" начинает вращаться под действием реактивной силы в направлении, противоположном тому, куда вытекают струйки жидкости. Но равного ему утекания нет, ибо в этом случае "паучок" бы не вращался!

Единственное предположение, которое можно было сделать по этому поводу (если, разумеется, исключить чудо), состояло в том, что гелий все же утекал обратно вдоль стенки тончайшим слоем. Капица сначала так и предполагал: на рис. 7.11 показана предложенная им схема встречного движения жидкого He II. Однако при всем его искусстве экспериментатора обнаружить этот слой не удалось. Но факт оставался и требовал объяснения. Тут явно нужна была помощь теоретиков мирового класса.

Дело осложнялось и тем, что пока шли все эти исследования, наступили еще более тяжелые времена: в 1939 г. в Европе началась вторая мировая война.

Тем не менее научная работа в ряде центров, в том числе в ИФП, продолжалась. Результаты открытий П. Л. Капицы и его предшественников были опубликованы и стали известны теоретикам; некоторые из них, в частности Ф. Лондон из Оксфорда, сделали первые шаги к созданию теории He II. Но решающие заслуги в этом связаны с именами двух еще молодых в то время людей.

Первым из них был венгерский физик Ласло Тисса (Тисса), которому в 1938 г., когда он разрабатывал теорию He II, шел 31-й год. Он учился в Геттингенском и Лейпцигском университетах, а в 1932 г. получил докторскую степень в Будапештском университете. В 1935–1937 гг. работал в Харьковском физико-

техническом институте вместе с Л. В. Шубниковым, где и приобщился к криофизике. С 1937 г. работал в Коллеж де Франс в Париже, а затем с 1941 г. в Массачусетском технологическом институте (США).

Л. Тисса предложил безумную, на первый взгляд, идею, основанную на предположении, что He II представляет собой композицию из двух взаимопроникающих жидкостей – сверхтекучей, обладающей нулевой вязкостью, и нормальной, имеющей вязкость и несущую некоторую внутреннюю энергию, обеспечивающую перенос тепла. Обе могут одновременно двигаться по одному каналу в противоположных направлениях, не взаимодействуя между собой. Такая "двухжидкостная модель" хорошо объясняла не только опыты Капицы, но и позволила предсказать некоторые другие эффекты, открытые впоследствии для He II.

В опыте Капицы (рис. 7.10, а) при таком подходе отпадает необходимость в привлечении пристеночного течения встречного тонкого слоя для объяснения эффекта. По горловине колбочки просто идут два встречных потока: один – "нормальный" – наружу, выносящий энергию, подводимую греющей спиралью, и другой – встречный "сверхтекучий", идущий "сквозь" первый. Поскольку вязкостью обладает только нормальная жидкость, она давит на диск 4 и отклоняет его, а сверхтекучая жидкость, не имеющая вязкости, на него не действует.

Смелая идея Тиссы вызвала двойную реакцию: некоторые отвергли ее как фантастическую, но другие, в том числе Капица, хотя и не сразу, приняли ее.

П. Л. Капица предложил очень остроумную аналогию механизма "сквозного" течения двух встречных потоков частиц в He II. Он сравнил их с потоками одетых и неодетых людей, которые движутся по проходу в раздевалке театра. Одетые будут представлять собой нормальные атомы гелия, получившие в гардеробе нужную им "энергию", а неодетые – это сверхтекучие атомы гелия, которые легко проходят мимо своих одетых собратьев. Правда, Капица замечает, что эта аналогия условна, поскольку на самом деле неодетым не так уж легко продвинуться через толпу одетых без трения; тем не менее она очень наглядна.

Двухжидкостная модель Тиссы была взята за основу рядом крупных физиков, чтобы развить ее и подкрепить основатель-



Рис. 7.12. Л.Д. Ландау

ной теоретической базой. Среди них были Ф. Лондон, Л. Ландау, Л. Онзагер, Р. Фейнман. Наибольший вклад в нее сделал Ландау, который после разгрома лаборатории Шубникова ежовскими борцами за уничтожение "шпионов и вредителей" уехал из Харькова. Его взял к себе П. Капица в Институт физических проблем заведующим теоретическим отделом. Этот переход был связан с рядом трудностей, которые все же удалось преодолеть. Однако Ландау был уже "под колпаком" НКВД. Наивный генерал Н. Бор, ничего, естественно, не зная о ситуации, пригласил Ландау поработать в Данию. П.Л. Капица

дипломатично ответил, что "говорил с ним об этом, и он сказал, что в настоящее время он очень занят своей новой теоретической работой и думает, что было бы лучше отложить его визит на более поздний срок". Но Ландау ждала другая поездка. Едва он приступил к работе в Москве, как в апреле 1938 г. был арестован. П.Л. Капица приложил огромные усилия, чтобы его освободить: писал Сталину, Молотову, был на приеме у заместителей Берии (который к этому времени уже заменил снятого Ежова). В конце концов под письменное "личное поручительство" Капицы Ландау (который уже полностью согласился с тем, что он шпион и контрреволюционер) был освобожден. Ровно через год он вернулся на прежнее место в ИФП и активно включился в работу. Уже в 1940–1941 гг. одновременно с работами Капицы вышли в свет его исследования по теории Не II.

П.Л. Капица поддерживал положения и выводы Ландау, но все же оставалось в силе его замечание по поводу двухжидкостной теории, состоящее в том, что она звучит "как идея, которую очень трудно признать разумной". Было бы очень полезно, как он считал, провести такой эксперимент, который окончательно показал бы наличие двух жидкостей ("компонент", говоря языком физиков) в Не II. Это было сделано Э. Андроникашвили – докторантом П.Л. Капицы в ИФП.

Э. Андроникашвили начал стажировку в качестве докторанта у Капицы в ИФП в 1940 г. и продолжил ее после перерыва,

связанного с войной (1945–1948 гг.). Здесь он и провел тот, ставший классическим эксперимент с Не II, о необходимости которого говорил Капица¹.

Идея заключалась в том, что в сосуде с Не II нужно было двигать какой-нибудь объект с развитой поверхностью, погруженный в жидкость. Нормальная компонента, обладающая вязкостью, увлекалась бы его поверхностью, и силу ее сопротивления можно было бы измерить. Сверхтекучая компонента, напротив, никак не влияла бы на этот объект, так как не имела вязкости. Меняя температуру Не II, можно было бы определить, как изменяется соотношение нормальной и сверхтекучей компонент (если они существуют). Для этого была изготовлена стопка из 100 тонких металлических дисков (толщиной 10 мк, т.е. 0,01 мм), надетых на стержень, с расстоянием между ними 0,02 мм. Это сооружение погружалось в жидкий гелий, и длинный конец стержня, выходящий наружу, закреплялся в верхней части. Стержень (вместе с дисками) приводился в крутильные колебания. Сила, которая их тормозила, определяемая трением о нормальную компоненту, могла быть определена по уменьшению периода крутильных колебаний.

После того как были преодолены многочисленные экспериментальные трудности, стенд заработал.

Результаты опытов полностью подтвердили двухжидкостную модель: при понижении температуры торможение вращения дисков, определяемое вязкостью нормальной компоненты, постепенно уменьшалось и где-то в области температур, близких к 0,5 К, прекращалось совсем.

За эту работу Э. Андроникашвили получил в 1952 г. Государственную премию.

Что касается заслуг П.Л. Капицы и Л. Ландау в области исследований, связанных с криофизикой, и в частности с жидким гелием, то они были оценены с некоторым опозданием.

Л. Ландау был удостоен Нобелевской премии по физике "за пионерские исследования по теории конденсированных сред, особенно жидкого гелия" в 1962 г. (более чем через 20 лет), а П. Капица получил ее "за фундаментальные изобретения и

¹ События, связанные с работами по криофизике в ИФП, очень интересно и правдиво, в блестящей литературной форме, описаны самим Э. Андроникашвили [14]; история заключения и освобождения Л. Ландау приведена в [17].

открытия в области физики низких температур”¹ в 1978 г. (т.е. примерно через 40 лет после того, как они были сделаны). Лучшее поздно, чем никогда!

Теоретические работы по сверхтекучему гелию к этому времени (70-е годы) нашли уже практическое применение. Развилось и новое направление в криогенной технике, которое П. Л. Капица начал еще в конце 30-х годов работами по разделению воздуха и производству кислорода. Здесь он вызвал потрясения не меньшие, чем в области исследований жидкого гелия.

Об этих и других событиях в области физики и техники низких температур пойдет речь в гл. 8. Здесь же, чтобы закончить обзор истории ”сверхъявлений”, нужно вернуться к дальнейшему развитию событий в области сверхпроводимости.

7.4. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ – РАЗОЧАРОВАНИЯ, УСПЕХИ И НАДЕЖДЫ

После первоначальной эйфории, охватившей ученый мир, узнавший об открытии Камерлинг-Оннесом сверхпроводимости, наступило и некоторое разочарование, связанное как с тем, что сверхпроводимость легко разрушалась под действием электрического и магнитного полей, так и с тем, что не удалось обнаружить веществ, которые сохраняли ее при $T > 10$ К. Тем не менее физики продолжали исследования.

Вопрос могли решить лишь новые факты, полученные из экспериментов, и теория, которая, с одной стороны, могла бы ”вместить” эти факты и, с другой стороны, показала бы, на что можно было рассчитывать в перспективе.

Мы не можем здесь детально вникать в историю событий, связанных со сверхпроводимостью; они подробно описаны во многих научно-популярных изданиях [1, 6, 8, 14]. Отметим лишь основные вехи.

В 1933 г. Мейснер и Оксенвельд обнаружили, что внешнее магнитное поле не проникает внутрь сверхпроводника, если его значение не превышает некоторого критического значе-

¹ Характерно, что в этой формуле отмечаются его заслуги не только научные, но и инженерные!

ния¹. Это явление – ”выталкивание” магнитного поля из сверхпроводника получило название ”эффекта Мейснера”. Последующие исследования дополнили картину процессов в сверхпроводнике, связанную с этим эффектом.

Среди них важное место заняли результаты, полученные Л. Шубниковым в Харькове еще в 1934 г. и затем А. Шальниковым в Москве. Они обнаружили внутри сверхпроводника сложное ”промежуточное состояние” – чередующиеся сверхпроводящие и нормальные слои. Такой ”слоеный пирожок” получил название ”фазы Шубникова”. Оказалось, что при увеличении поля оно проникает в сверхпроводник не сразу (и следовательно, подавляет сверхпроводимость тоже не сразу). Это сложный процесс; сверхпроводник ему упорно сопротивляется, отстаивая каждую промежуточную позицию. Если можно было бы как-то увеличить это противодействие, то повысились бы и критические токи, и критические температуры.

В 1937 г. Ландау теоретически вывел то же, что показал Шубников в эксперименте, – в сверхпроводнике переход в нормальное состояние должен происходить не сразу, а постепенно. Понятие о таком ”промежуточном” состоянии сверхпроводников ввели за год до этого в Англии Р. Пайерлс и Ф. Лондон. По мере увеличения поля оно частично проникает в сверхпроводник, причем должны образоваться чередующиеся слои – сверхпроводящие и нормальные.

В 1950 г. Л. Д. Ландау и В. Л. Гинзбург сделали следующий шаг – они создали феноменологическую² теорию сверхпроводимости. В основу была положена идея Ландау об аналогии между сверхпроводимостью и сверхтекучестью.

В том же 1950 г. группой советских физиков была начата разработка теории так называемых *сверхпроводников II рода*, которые могли более успешно сопротивляться проникновению в них магнитного поля, чем обычные, камерлинг-оннесовские (теперь они стали называться *сверхпроводниками I рода*). Кро-

¹ В 1934 г., еще не зная о работе Мейснера, это явление открыл Л. Шубников.

² Феноменологическая – от греческого слова ”феномен” – явление, т.е. то, что постигается наблюдением, живым восприятием; противоположно по смыслу слову ”ноумен” – умопостигаемое, абстрактное. Применительно к физической теории означает, что она обобщает экспериментально найденные явления, не претендуя на достаточно полное объяснение их причин (это, однако, не отрицает ее возможности прогнозировать и новые факты).

ме Ландау в эту группу входили В. Л. Гинзбург, А. А. Абрикосов и Л. П. Горьков. Сокращенно эта теория называлась ГЛАГГ. К 1952 г. работа была завершена.

В 1956 г. американский физик Л. Купер разработал новую теорию, по которой свободные электроны, несущие ток, в сверхпроводнике движутся не индивидуально, а образуют пары. Такая "любовная связь" между ними считалась до этого абсолютно невозможной, поскольку, имея одинаковые отрицательные заряды, они должны взаимно отталкиваться. Однако при криотемпературах их взаимодействие с атомной решеткой металл создает силы притяжения, преодолевающие это отталкивание. Электроны, движущиеся парами (так называемые "куперовские пары"), перемещаются в сверхпроводнике без сопротивления. Но, увы, связи этих пар прочны только при низких температурах; подогрев или действие сильного магнитного поля приводят к их разрыву, и сверхпроводимость исчезает. Теория "куперовских пар", как они были потом названы, дала прочную основу для понимания сверхпроводимости.

Год 1957 был знаменательным не только потому, что в нем были сделаны многие фундаментальные работы в области сверхпроводимости. В этом году, во время "оттепели", П. Л. Капица снова получил "международное хождение". После долгого перерыва в Москве на конференции по физике низких температур, проходившей в ИФП у Капицы, встретились люди, работавшие в разных странах над исследованиями сверхтекучести и сверхпроводимости. На традиционном банкете в честь завершения конференции первый тост был принят в память Л. В. Шубникова.

Наконец, в том же 1957 г. (через 46 лет после открытия Камерлинг-Оннеса) была создана первая достаточно полная для того времени микроскопическая теория сверхпроводимости, основанная на "куперовских парах". Это было сделано независимо в СССР Н. Боголюбовым и в США Дж. Бардином, Л. Купером и Дж. Шриффером (БКШ-теория). Американские физики в 1972 г. получили за эту работу Нобелевскую премию.

Параллельно с развитием теории шли и поиски новых, более устойчивых сверхпроводников (СП), возможность существования которых она предсказывала. И действительно, в 1961 г. первый такой сплав ниобия с оловом Nb_3Sn был получен в США Л. Кунцлером. Были найдены и другие сплавы, критические

температуры которых доходили до 24 К. Они позволили создавать мощные магнитные поля.

Мечта Камерлинг-Оннеса наконец осуществилась. Началась полоса разработок электротехнических устройств на сверхпроводниках, и прежде всего мощных магнитов, дающих поля в десятки Тесла¹, и не на короткое время, а постоянно.

Если говорить о главном направлении, в котором сверхпроводники уже заняли прочное место, — изготовлении соленоидов для создания сильных магнитных полей, то здесь при использовании постоянного тока тепловыделений практически нет. Поэтому криорефрижератор должен отводить только тепло, проникающее через изоляцию, а оно сравнительно невелико. Соленоид запитывается током один раз, а затем он практически неограниченно долго циркулирует в обмотке.

Сейчас компактные сверхпроводящие устройства, обеспечивающие сильные магнитные поля, нашли широкое применение прежде всего в научных исследованиях для создания экспериментальных установок, в частности ускорителей заряженных частиц, пузырьковых камер и, наконец, "магнитных ловушек" для удержания плазмы в термоядерных исследованиях.

В промышленности СП-магниты используются для сепарации материалов, содержащих ферромагнитные примеси, для безрельсовых поездов на магнитной подвеске, в некоторых электрических машинах. Наконец, они помогли сделать существенный шаг вперед в медицине как для магнитной диагностики (томография), позволяющей без рентгеновского облучения увидеть на экране любой участок внутри человеческого тела, так и для лечения.

Все эти успехи породили надежды и на более широкое использование СП в энергетике. Это касалось главным образом трех задач: создания дальних линий электропередачи (ЛЭП) с малыми потерями, крупных электрических машин (генераторов и двигателей) и, наконец, накопителей энергии.

¹ Чтобы представить себе силу такого поля, можно привести пример. Чтобы вытащить из поля с магнитной индукцией, равной 10 Тл, обыкновенный железный гвоздь весом 10 г, нужно приложить силу, равную весу около 10 000 таких гвоздей, т.е. около 100 кг.

Решение первой задачи сулило существенное снижение потерь в ЛЭП и возможность осуществлять "перекачку" огромных потоков электроэнергии между отдаленными районами для покрытия "пиков" потребления. Если бы удалось решить вторую задачу, то это дало бы возможность не только снизить электрические потери в машинах, но и уменьшить чуть ли не вдвое их габариты. Соответственно можно было бы во столько же раз увеличить их единичную мощность, что дало бы очень большой экономический эффект.

Наконец, создание крупных накопителей электроэнергии в виде огромных СП-соленоидов, запитываемых током во время "провалов" в ее потреблении и отдающих ее в сеть во время "пиков", имело бы колоссальное значение. Оно сняло бы главный недостаток электроэнергии – невозможность запастись ее в больших количествах. Химические аккумуляторы или батареи конденсаторов на это неспособны.

Однако "гладко было на бумаге, да забыли про овраги, а по ним ходить". "Оврагов" оказалось очень много. Для длинных ЛЭП не хватило бы гелия, производимого в развитых странах; в машинах трудно обеспечить тепловую изоляцию и подачу жидкого гелия в движущиеся части. В крупных накопителях возникали такие разрывающие усилия от отталкивания обмоток, что нужно было помещать соленоид в прочнейшую конструкцию диаметром сотни метров и к тому же теплоизолированную... И главное, нужно много мощных гелиевых рефрижераторов, которые и стоят немало, и электроэнергии потребляют очень большое количество (на вырабатываемый 1 кВт·ч холода 400–500 кВт·ч электроэнергии).

Все это, в принципе, преодолимо. Но экономика... как говорил один умный академик: "Современная техника может очень много. Можно даже, если всерьез заняться, перекачать Атлантический океан в Тихий. Но возникают два вопроса: нужно ли это и сколько это стоит?"

На первый вопрос, применительно к СП-устройствам, в некоторых из упомянутых случаев можно ответить положительно; но как быть со вторым? Из-за невозможности ответить на него утвердительно, работы во всех трех перечисленных направлениях далеко не продвинулись, хотя частные успехи все же были.

Дело снова затормозилось и, как всегда в таких случаях, число скептиков резко возросло, а оптимистов осталось мало.

Стало ясно, что если сверхпроводимость не оторвется вверх от уровня гелиевых и водородных температур, она в нужном объеме никогда не решит глобальные задачи, перечисленные выше.

Как это ни парадоксально, "гелиевая" криогеника, которая породила сверхпроводимость, ее и убивает! Для следующего прорыва в технике, выхода на новую *s*-кривую нужно было выйти хотя бы на уровень азотных температур.

Среди оптимистов, уверенных в том, что сверхпроводимость вырвется на более высокий температурный уровень, ведущее место занимал акад. В. Гинзбург (тот самый, который совместно с Л. Ландау был автором одной из основополагающих теорий сверхпроводимости). Он даже написал книгу на эту тему, где ввел в употребление термин "высокотемпературная сверхпроводимость" и рассмотрел возможные ее варианты.

Однако обнаружить экспериментально что-либо подобное не удавалось, несмотря на то что физики-оптимисты во всем мире вели упорный поиск.

Все же, в конце концов, в 1986 г. прорыв состоялся, но не там, где его ждали.

Сотрудники швейцарского научно-исследовательского подразделения известной американской фирмы "Интернейшенл бизнес мэшин" Дж. Беднорц и А. Мюллер, исследуя электропроводность керамики, содержащей редкоземельные элементы¹, обнаружили, что она переходит в сверхпроводящее состояние при 30 К! Дальше сенсации посыпались одна за другой – лаборатории во многих странах "навалились" на такие керамики. Были найдены аналогичные материалы, сохранявшие сверхпроводимость и при более высоких температурах, вплоть до азотных (78 К) и даже более высоких, превышавших 100 К. Дж. Беднорц и А. Мюллер вполне заслуженно стали в 1987 г. лауреатами Нобелевской премии.

С открытием высокотемпературной сверхпроводимости связана одна немного грустная, но поучительная история. Еще за семь лет до этого события, в 1979 г., сотрудники Института общей и неорганической химии (ИОНХ) АН СССР И. С. Маты-

¹ Редкоземельные элементы – лантаноиды, относятся к III группе таблицы Менделеева. Кроме лантана в нее входят еще 14 элементов (церий, гадолиний, диспрозий, туллий и др.).

гин, Б. Г. Кохан и В. Б. Лазарев сделали лантан-стронциевую и лантан-бариевую керамики. Изучая их свойства, они обнаружили высокую электропроводность, которая быстро увеличивалась по мере понижения температуры. Вместо того чтобы посмотреть, к чему это понижение сопротивления в конце концов приведет, они добрались до азотных температур и ... остановились. Потом выяснилось, что эти керамики уже при 40–35 К переходят в сверхпроводящее состояние. Не хватило всего-навсего любопытства, чтобы посмотреть, что будет дальше. Но для этого нужно было возиться с жидким гелием (или водородом)... Так было упущено великое открытие. Поистине А. С. Пушкин оказался и здесь, как во многих случаях, прав, когда написал "мы ленивы и нелюбопытны".

Несмотря на значительную работу теоретиков всего мира, механизм этого вида сверхпроводимости далеко еще не ясен.

Сенсационное открытие высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) возродило надежды на создание СП-линий электропередачи, накопителей электроэнергии, генераторов и многих других устройств. Ведь главное препятствие – трудное и дорогое обеспечение криотемператур на гелиевом или водородном уровнях – отпадало! Работать с жидким азотом или другими аналогичными криоагентами гораздо легче! Некоторые "специалисты" (правда, далекие от криогеники) даже утверждали всерьез, что "жидкий азот дешевле газированной воды". Это, конечно, далеко не так. Однако переход с уровня температур 4–20 К на уровень температур 80–100 К несомненно создал бы совершенно новые, качественно более благоприятные условия для расширения использования сверхпроводников в технике.

Но, увы, все оказалось сложнее. Повторяется та же ситуация, что создалась во времена Камерлинг-Оннеса после открытия сверхпроводимости. Новые керамические проводники пока не выдерживают больших токов – сверхпроводимость легко разрушается. Кроме этого, для практического использования нужны сверхпроводящие провода и кабели, а не пластинки или пленки из керамики. Поэтому идет сложная, медленно продвигающаяся, но не безуспешная работа по созданию новых высококачественных сверхпроводников и изделий из них, пригодных для технического использования. Если она завершится успешно, то откроются огромные возможности: все описанные выше

проекты (да и многие другие) пойдут в ход. Появится возможность создания линий электропередачи, электрических машин, компактных накопителей (аккумуляторов) энергии огромной емкости – стационарных и транспортных, мощных электромагнитов, приборов и другого оборудования (вплоть до "магнитных пушек", забрасывающих объекты в Космос).

Проблемы, относящиеся к области низких температур, в перспективе могут быть различными; скорее всего значительная часть СП-устройств будет по-прежнему нуждаться в криогенной или холодильной технике. Правда, некоторые "горячие головы" утверждают, что вся сверхпроводимость станет возможной на уровнях температур окружающей среды и даже более высоких. В этом случае расторжение многолетнего союза между сверхпроводимостью и криогеникой вполне возможно. Пока же этот "брак" достаточно прочен и "развода" не намечается.

Теперь необходимо вернуться к основной теме – низким температурам и проследить, как развивалась во второй половине XX в. ее наиболее низкотемпературная часть – криогеника и ее приложения в технике.

Глава восьмая

КРИОГЕННАЯ ТЕХНИКА XX В.

*Все, что позоляет теория,
может быть осуществимо.*

Ж. Клод

8.1. "КИСЛОРОДНЫЕ ДЕЛА"

Еще до начала вызвавших международную сенсацию работ по жидкому гелию П. Л. Капица задумал взяться и за работу в совсем другой и новой для него области низкотемпературной техники – получение кислорода из воздуха.

Это направление принципиально отличалось от гелиевого не только тем, что относилось к области менее низких температур. Более существенное отличие состояло в том, что задачи здесь входили в сферу уже не экспериментально-физического исследования, а скорее инженерного творчества. Кроме этого, здесь перед Капицей была не "едва тронутая целина", а относительно давно существующая, развитая область техники,

в которой поработали такие первоклассные исследователи и инженеры, как К. Линде, Ж. Клод и др.

К началу 40-х годов мировая техника низкотемпературного разделения воздуха достигла уровня, позволяющего серийно выпускать установки, производящие газообразный кислород до 3600 м³/ч (или азот 7000–8000 м³/ч), а также жидкостные установки, дававшие жидкие кислород или азот до 500 кг/ч. Была отработана до промышленного уровня и технология получения из воздуха инертных газов – аргона, криптона, ксенона и неона.

Постепенно расширялась и сфера применения продуктов разделения воздуха. Кислород использовался для так называемых автогенных работ (резки и газовой сварки металлов), в медицине, для обеспечения дыхания при высотных полетах. Азот шел на синтез аммиака и последующее получение азотной кислоты и минеральных удобрений, инертные газы – для заполнения электроламп накаливания и газосветных трубок.

Таким образом, в области воздухоразделительной техники все росло, развивалось и распространялось.

Это благополучие ничуть не смутило Капицу. Он с величайшим уважением относился как к Линде, так и Клоду и не раз подтверждал это в своих статьях и переписке. Однако он считал, что созданная ими техника при всех ее достоинствах далеко не совершенна и уже не удовлетворяет потребностям общества середины XX в. Особенно скептически он оценивал достижения наших ведущих отечественных деятелей того времени в области разделения воздуха и получения жидких кислорода и азота. Он считал (не без основания), что они просто плетутся в хвосте и лишь перенимают заграничную (в основном немецкую) технику.

К этому времени в области воздухоразделительной техники сложилась ситуация, характерная для сатурационной ветви s-кривой. Развитие в отрасли замедлилось, и качественные характеристики систем разделения воздуха практически длительное время оставались примерно на одном и том же уровне. Вместе с тем подошло время для выхода на новую ступень развития; условия для этого уже были подготовлены со стороны как потребностей общества, так и накопления необходимого для качественного скачка научно-технического задела. Несмотря на всю эрудицию, у ведущих деятелей этой области не хватало интуиции, чтобы все это почувствовать; Капица же

не отягощенный грузом устоявшихся представлений, понял ситуацию во всем ее объеме.

Прежде всего немного о первом условии – общественной потребности. Известно, что любое изобретение, каким бы хорошим и даже гениальным оно не было, безжалостно отвергается обществом, если потребность в нем еще не назрела. Примеров тому бесчисленное множество: достаточно вспомнить изобретения Леонардо да Винчи и многих других гениев, опередивших свое время. И напротив, если соответствующая потребность возникла, новая техника относительно быстро идет в ход. (Это, разумеется, не исключает борьбы и более чем достаточного набора трудностей.)

С производством кислорода дело обстояло именно так. Кислород – как газообразный, так и жидкий, становился все более нужным и во все больших количествах. Спрос на него начинала предъявлять черная металлургия (дутье, обогащенное кислородом, в доменном и сталеплавильном производствах). Появлялись при этом и новые процессы, вызывавшие поначалу шок у ведущих металлургов, – например, дутье технически чистым неразбавленным кислородом прямо в расплавленный чугун в сталеплавильных конвертерах. Раньше это считалось просто немыслимым – должен был неизбежно последовать взрыв! Кислород позволял интенсифицировать процессы и в цветной металлургии, химической промышленности, газификации топлив, производстве цемента и т.п. Дошло до того, что даже у такого "специалиста" в области техники, как Л. М. Каганович, в доклад на XVIII съезде ВКП(б) был вставлен целый раздел "О применении кислородного дутья в доменном производстве"¹.

На горизонте уже вставала в качестве серьезного потребителя жидкого кислорода ракетная техника; она прошла к этому времени длительный путь – от идеи жидкостного реактивного двигателя (К. Э. Циолковский, Россия, 1903 г.) и первой жидкостной ракеты (Р. Годдард, США, 1926 г.) до разработок ГИРД (Ф. А. Цандер, В. П. Глушко, С. П. Королев, СССР, и Г. Оберт, В. фон Браун, Германия). Уже вовсю развернулись

¹ Тут не обошлось, по-видимому, без влияния П. Л. Капицы, пытавшегося (за редким исключением без особого успеха) в своих письмах Сталину, Молотову и Кагановичу [10, 11] объяснить, что такое научно-технический прогресс и как ему способствовать.

работы по созданию баллистических ракет V-1 и V-2, которыми немцы вскоре начали обстреливать Англию через Ла-манш.

Второе условие – наличие научно-технического задела в технике разделения воздуха – определялось, главным образом, появлением двух нововведений – низкотемпературных регенераторов и турбодетандеров. Их начальное развитие было непосредственно связано с фирмой, созданной К. Линде.

Регенераторы как устройства для подогрева воздуха отходящими горячими газами были известны давно, с середины XIX в., и применялись в сименс-мартеновском процессе выплавки стали¹. Идея их была очень проста: через кладку огнеупорных кирпичей, уложенных так, что через нее могли проходить газы, поочередно пропускались противотоком поступающий в печь воздух и отходящие горячие дымовые газы. Здесь использован тот же принцип, что и в холодном генераторе (см. рис. 3.6). Эти газы нагревали кирпичи (насадку), а сами охлаждались; затем через горячую насадку в противоположном направлении пропусклся воздух, который, нагреваясь, охлаждал насадку. Так, последовательно переключая потоки, можно было нагревать воздух за счет охлаждения отбросных газов.

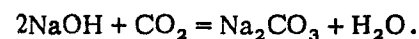
Молодой инженер М. Френкль предложил использовать в процессах низкотемпературного разделения воздуха такого рода регенераторы вместо теплообменников для охлаждения поступающего сжатого воздуха выходящими кислородом и азотом. Поначалу эта идея вызвала у профессионалов-эрудитов даже не отрицание, а просто снисходительно-ироническое отношение. Применить эти грубые громоздкие кирпичные сооружения, в которых разности температур между потоками составляют десятки градусов, к тонкой технике разделения воздуха? Ведь здесь каждый градус и каждая калория ценятся на вес золота!

Тем не менее Френкль не отступал. Кирпичи были заменены тонкой гофрированной алюминиевой лентой (насадкой), каменный короб – стальным цилиндром. Получились компактные аппараты, в которых на 1 м³ объема приходилось несколько тысяч квадратных метров площади поверхности теплообмена

¹ Одним из создателей этого процесса был В. Сименс, который предложил в 1857 г. схему процесса газовой регенеративной холодильной установки.

(вместо нескольких сотен в трубчатых теплообменниках). Этот успех был относительно быстро достигнут благодаря дальновидности фирмы Линде, которая приобрела патент Френкля и провела дорогостоящие работы по доведению его идеи до инженерного решения.

Однако дело не ограничилось только улучшением теплообмена. Оказалось, что регенераторы Френкля обладали еще одним важнейшим достоинством – они могли очищать воздух от примесей водяного пара и углекислого газа. Эти примеси в свое время причинили много неприятностей К. Линде. Они замерзали в теплообменнике и вентилях, забивали ректификационную колонну. Аппарат периодически приходилось отогревать, чтобы удалить из него вредные примеси. Мало этого, жидкий воздух (и кислород) выглядели как молоко из-за кристаллов твердого диоксида углерода. Чтобы очистить от них жидкость, приходилось ее фильтровать, как это делал Умов, показывая жидкий воздух московским профессорам и купцам. В дальнейшем задача очистки воздуха от этих примесей была решена: после сжатия он пропусклся через баллоны с твердым едким натром NaOH, который поглощал влагу, а раствор того же вещества удалял в специальных аппаратах и углекислый газ:



Вся эта система очистки и осушки воздуха была громоздкой, дорогой и очень неприятной в эксплуатации.

В регенераторах одновременно с охлаждением воздуха, так же как и в трубчатых теплообменниках, происходило высаживание льда на холодной поверхности (сначала воды, а в более холодной части и CO₂). Однако обратный поток кислорода (или азота) после переключения каждый раз испарял (сублимировал) кристаллы и выносил примеси из регенератора. Поэтому они не накапливались и не проникали в разделительный аппарат.

Таким образом, регенераторы позволили не только усовершенствовать теплообмен, позволяя охладить большое количество воздуха (и нагреть соответственно продукты разделения – кислород и азот), но и избавиться от специальной его очистки.

Турбодетандер (второе принципиальное усовершенствование разделения воздуха) был старой мечтой специалистов по низким температурам. Идея применить турбомашину для расширения и охлаждения воздуха была предложена уже давно (Д. Рэлеем, 1898 г.). Поршневой детандер, впервые введенный в начале нашего века Клодом до уровня надежного рабочего устройства, не годился для переработки больших количеств воздуха. Как и всякая поршневая машина, он был хорош при малой производительности, но делался громоздким и неэффективным при большой.

Однако реализовать турбомашину как детандер долго не удавалось. В принципе, она должна была по конструкции на паровую турбину, уже хорошо освоенную в то время. Необходимость обеспечить низкие температуры в рабочей зоне и вывести вал для отвода мощности наружу в теплую зону создавала большие трудности. Только в начале 30-х годов немецкой фирме "Сюрт" удалось по заказу Линде сделать надежно работающий турбодетандер. Однако КПД его был относительно невысок и не превышал 0,52–0,58. Тем не менее это было серьезным достижением.

Фирма Линде, используя обе новинки – регенераторы Френкля и турбодетандер, создала воздуходелительные установки "Линде-Френкль" для получения газообразного кислорода производительностью до 3600 м³/ч кислорода. В них большая часть воздуха сжималась до низкого давления (0,6 МПа), необходимого для ректификации в колонне. Этот воздух сжимался в турбокомпрессоре, а затем охлаждался и очищался в регенераторах. Необходимое охлаждение происходило в турбодетандере, который работал тоже при начальном давлении 0,6 МПа. Но он все же не обеспечивал всю нужную холодопроизводительность и приходилось часть воздуха (5–6%) сжимать до высокого давления и дросселировать, как в классическом процессе Линде. Для этого пришлось сохранить поршневой компрессор и химическую очистку воздуха. Таким образом, получился некий гибрид из нового (низкое давление воздуха, регенераторы, турбокомпрессор, турбодетандер) и старого (высокое давление воздуха, поршневой компрессор, химическая очистка). Но доля воздуха, сжимаемого до низкого давления, все же превышала 95%. Эти установки, несомненно, были большим достижением 30-х годов в этой области техники.

Что касается установок для получения жидких кислорода или азота, то они строились только по классическим схемам высокого давления с громоздкими поршневыми машинами и химической очисткой воздуха.

Таким образом, в области получения газообразного кислорода как турбомашин (и компрессор, и детандер), так и теплообменная аппаратура (регенераторы) позволяли использовать более удобное низкое давление воздуха; но полностью вытеснить применение воздуха высокого давления еще не могли. Вот если бы удалось повысить КПД турбодетандера на 15–20% – другое дело! Тогда холода бы хватило, и все громоздкие "поршняки" и химическую очистку воздуха высокого давления можно было бы убрать. Да и об установках низкого давления для получения жидкого кислорода можно было бы подумать. Это был бы решающий качественный скачок.

П. Л. Капица начал штурм "кислородно-криогенной" крепости именно с турбодетандера. Он был вторым, после Ж. Клода, творцом поршневого детандера (вспомним, что Капица еще в 1934 г. в Кембридже создал первый гелиевый поршневой детандер), но с турбодетандерами, так же как вообще с турбомашинами, он никогда не имел дела. Именно это (в сочетании, разумеется, с выдающимися способностями и физика, и инженера) ему, по-видимому, и помогло.

За необычайно короткий срок – два года – он с блеском решил задачу, создав новую машину, настолько эффективную, что она обеспечила целую революцию в криогенной технике.

Чем же объясняется резкое повышение КПД турбодетандера (на 15–20%, которых не хватало), достигнутое Капицей? Очевидно, что тут дело было не в частных усовершенствованиях, а в принципиальном изменении.

Чтобы разобраться, в чем здесь дело, посмотрим, как устроен турбодетандер внутри (рис. 8.1). Как и у всякой турбины, в нем имеется расположенный по периферии неподвижный направляющий аппарат и помещенное внутри него вращающееся рабочее колесо. В направляющем аппарате по окружности расположены сопла, где, расширяясь, поток рабочего тела разгоняется и приобретает определенную скорость. Попадая на лопатки рабочего колеса, рабочее тело вращает его, производя работу и отдавая энергию. Скорость при этом снижается. Отработавшее рабочее тело выпускается через патрубок в центре рабочего колеса. Так устроены все турбины –

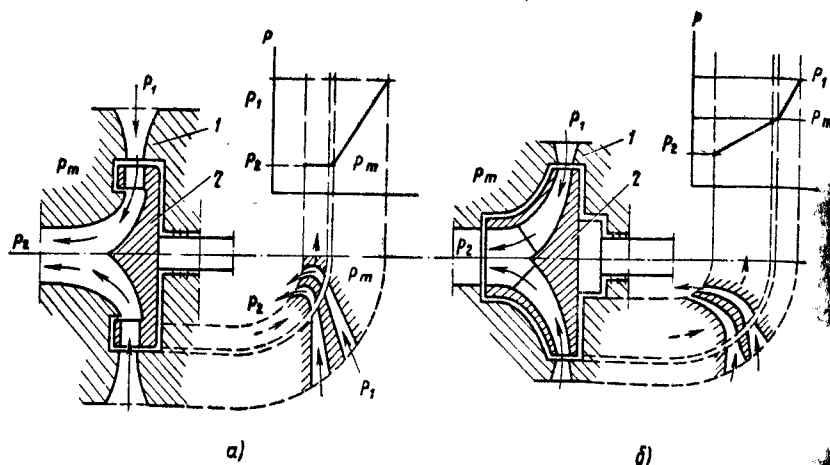


Рис. 8.1. Принцип работы турбодетандера:

а — активного; б — активно-реактивного; 1 — направляющий аппарат; 2 — рабочее колесо

паровые, газовые и водяные. По характеру движения текущего рабочего тела в направляющем аппарате и колесе турбины делятся на *активные* и *реактивные*. В турбодетандере активного типа направляющий аппарат имеет сужающиеся каналы, в которых газ разгоняется до большой скорости (близкой к скорости звука, т.е. несколько сот метров в секунду) и снижает начальное давление p_1 до значения p_m , почти равного конечному p_2 . Струи газа, попадая на вогнутые короткие лопатки рабочего колеса, меняют направление, оказывая на них давление, и вращают его.

Таким образом, кинетическая энергия потока преобразуется в работу. При этом давление газа падает незначительно, достигая конечного p_2 , а температура понижается.

По такому принципу работали все прежние турбодетандеры. П. Л. Капица решил перейти на другой принцип и создал реактивный (вернее, *активно-реактивный*) турбодетандер. В нем "распределение обязанностей" между направляющим аппаратом и рабочим колесом стало совсем другим, близким к тому, которое существует в водяных турбинах. Направляющий аппарат здесь снабжен менее длинными каналами, и в нем срабатывает лишь часть интервала давления от p_1 до p_2 ; значение

p_m находится примерно посередине. Газ разгоняется до значительно меньшей скорости, чем звуковая; она достигает лишь значения, необходимого для плавного, безударного входа в каналы рабочего колеса. Лопатки его сделаны длинными, и газ, проходя в каналах между ними, срабатывает оставшуюся часть $p_m - p_2$ интервала давлений, расширяясь в них. Работа совершается уже не только в результате изменения направления потока газа, но и под действием реакции¹ струи, вытекающей из межлопаточных каналов.

Вследствие того что скорость воздуха в активно-реактивном турбодетандере значительно ниже, гидравлические потери в нем намного меньше, чем в активном; эта разница имеет особенно существенное значение, потому что холодный сжатый воздух по плотности ближе к жидкой воде, чем к водяному пару. Именно это обстоятельство толкнуло Капицу обратить внимание на водяную турбину как конструктивный прототип турбодетандера. В конечном счете Капица сформулировал свое "кредо" так: "...правильно выбранный тип турбодетандера будет как бы компромиссом между водяной и паровой турбиной".

Работа над турбодетандером началась в 1936 г., а уже в 1938 г. в ИФП был создан небольшой опытный турбодетандер, у которого КПД составлял около 0,8! Затем, "не переводя дыхания", на базе этого турбодетандера была собрана опытная установка низкого давления воздуха, на которой получался жидкий воздух. Характерно, что все оборудование этой установки (за исключением компрессора) делалось из подручных материалов и изделий в мастерских ИФП. При этом была проявлена в высшей мере эффективная "солдатская находчивость". Так, например, механизм переключения регенераторов приводился в движение двумя электромагнитными транспортными тормозами завода "Динамо". Таким образом, впервые удалось оживить воздух, не сжимая его предварительно до высокого давления.

Наряду с процессами ожижения Линде и Клода, о которых мы уже говорили, появился новый, получивший в дальнейшем название "процесс Капицы". Поскольку он в дальнейшем стал

¹ Отсюда и термин "реактивный".

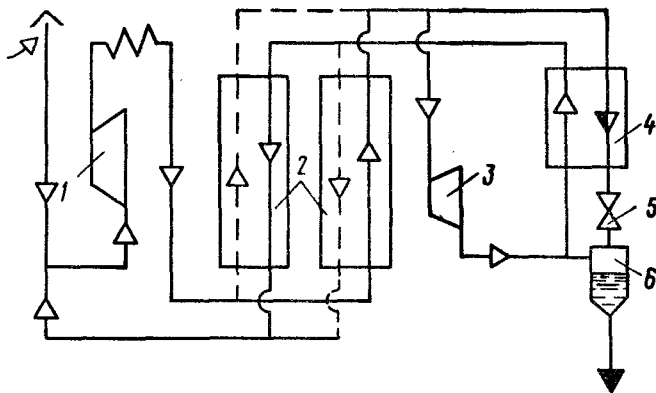


Рис. 8.2. Схема воздухоожижительной установки Капицы:

1 — турбокомпрессор для сжатия воздуха; 2 — регенераторы; 3 — турбодетандер; 4 — теплообменник-ожижитель; 5 — дроссель; 6 — отделитель жидкого воздуха

основой новых процессов получения газообразного кислорода, остановимся на нем несколько подробнее.

На рис. 8.2 показана схема воздухоожижительной установки Капицы (1939 г.). Нетрудно видеть, что отличия этой установки от установки Клода (см. рис. 5.13) связаны как с особенностями схемы, так и с оборудованием — одно обусловило другое. Низкое рабочее давление воздуха 0,6–0,7 МПа дало возможность использовать вместо основного теплообменника регенераторы и турбодетандер вместо поршневого детандера (поршневой компрессор был взят просто потому, что исследовалась модель с малой производительностью; в дальнейшем на более крупных установках устанавливался турбокомпрессор).

В схеме Капицы воздух в детандер отводился из теплообменника на самом низком температурном уровне так, чтобы в конце расширения он начинал конденсироваться и имел ту же температуру, что и пар, возвращающийся из отделителя жидкости. В этом и состоит основное отличие от схемы Клода, где воздух на детандер отбирается в середине теплообменника и возвращается в обратный поток при более высокой температуре, далекой от конденсации.

Расчеты показывают, что чем более высоким выбрано давление сжатого исходного воздуха, тем выше нужно брать температуру воздуха на входе в детандер и тем меньшую долю его

нужно расширять в нем. И напротив, чем ниже давление, тем большую долю воздуха нужно пустить в детандер и тем ниже будет оптимальная температура воздуха на входе в него. П.Л. Капица опустил детандер "вниз" до предела и тем самым смог понизить рабочее давление воздуха до 0,6–0,7 МПа, со всеми вытекающими из этого положительными последствиями. Раньше это было невозможно сделать, так как существующие детандеры не могли эффективно работать при столь низких температурах. Теперь же КПД турбодетандера, несмотря на его малые размеры, не только достиг заветного рубежа 0,8, но и перешел его, причем в наиболее сложных условиях — с окончанием процесса на границе ожижения. Успешный пуск и опытная эксплуатация экспериментальной установки показали, что путь к использованию низкого давления не только в технике ожижения воздуха, но и для его разделения открыт. Это, разумеется, не снимало необходимости решить целый ряд задач как по организации достаточной очистки воздуха и его ректификации, так и других, но в основе проблема была разрешена.

Публикация результатов этих работ в начале 1939 г. произвела подлинную сенсацию и поначалу вызвала некоторое замешательство среди специалистов-криогенистов. Однако никакой явно выраженной реакции не последовало — как у нас, так и за границей еще изучали и "переваривали" сенсационную новость.

Несмотря на все трудности, работы по ожижению воздуха при использовании низкого давления, а потом и по его разделению для получения кислорода продолжались. Их расширение потребовало подключения промышленных предприятий для изготовления оборудования. П.Л. Капица описал [10] много живописных деталей борьбы с руководителями различных уровней, всеми силами отбивавшихся (Капица писал более живописно — "отбрыкивавшихся") от дел, которые отвлекали их от выполнения планов. Тем не менее, благодаря отчаянным усилиям, когда приходилось заниматься не только основным делом, но и снабжением, строительством, кадрами и др., дело продвигалось. Работы шли одновременно в двух направлениях — по получению как жидкого, так и газообразного кислорода.

В июле 1940 г. удалось "пробить" решение Экономсовета при СНК СССР, в котором ИФП официально поручалось техническое руководство проектированием и испытанием турбокисло-

родных (ТК) установок на заводе-изготовителе. К началу 1941 г. в результате испытаний ряда экспериментальных установок был накоплен значительный опыт, позволявший приступить к проектированию и изготовлению первых промышленных образцов.

Какова же была реакция на эти достижения в ученом и промышленном мире?

Отечественные специалисты разделились на две партии. Одни поддерживали Капицу и сотрудничали с ним. Другие либо занимали выжидательную позицию, либо ограничивались негативными высказываниями на всякого рода совещаниях (особенно этим отличались те, кого Капица не приглашал к участию в своих работах).

За рубежом реакция на работы Капицы тоже была различной, но носила более явный характер. Наиболее дальновидными и активными оказались некоторые промышленные фирмы США (три) и Швеции (одна), которые предложили заняться производством кислородных установок по его патентам. Однако из-за существовавших тогда условий такое сотрудничество (очень выгодное для СССР) было невозможно.

В Германии, где были уже сложившиеся традиции и налаженное производство кислородных установок, отношение к работам Капицы было другим – вежливо-скептическим. В статьях двух ведущих немецких специалистов по низкотемпературной технике – Г. Хаузена (главного идеолога фирмы Линде¹) и П. Грассмана, вышедших в начале 1941 г., отдавалось должное заслугам Капицы, но в части, не относящейся к его работам в низкотемпературной области ("русский физик, уже известный во всем мире созданием особо сильных магнитных полей"). Однако по поводу двух основных идей Капицы (низкого давления воздуха и нового турбодетандера) и тот и другой предостерегали от "излишнего оптимизма".

Упоминая о том, что теоретический расход энергии на установках низкого давления воздуха для получения жидкого кислорода должен быть при равных условиях выше примерно на 20%, они не принимали в расчет, что для объективного сравнения должны быть равными только внешние условия. Но все

остальное: КПД машин, масса металла, исключение специальной очистки воздуха, надежность – было в пользу турбомашин и способа низкого давления. При получении газообразного кислорода и теория показывала преимущества низкого давления (при КПД турбодетандера около 0,8).

Г. Хаузен доказывал, что и на активном турбодетандере Линде можно добиться того же. Но, как показал Капица, это было невозможно в принципе. Все попытки "обмануть природу" и добиться этой цели потерпели неудачу как в Германии, так и в СССР. Наши отечественные противники Капицы потратили много сил и государственных средств на это дело.

П.Л. Капица написал ответ на критику Хаузена. Он хотел не только опровергнуть его доводы, но и "...заткнуть глотку нашим доморощенным злопыхателям, которые всегда рады, не зная подоплеки дела, охаять своего соотечественника"¹. Пока он собирался опубликовать его, наступило 22 июня 1941 г. ... Ответ остался неопубликованным. Работы над кислородными установками были прекращены, а в конце июля 1941 г. ИФП был эвакуирован в Казань.

Институт переключился на оборонную тематику, переориентировав на нее все свои ресурсы. Оказалось, что и работы по получению кислорода должны занять в ней важное место. Он нужен был для окислительных взрывчатых веществ², медицины и разворачивающихся военных производств. Поэтому все кислородное направление получило поддержку Государственного Комитета Оборона (ГКО), и дела, связанные с ним, пошли намного быстрее.

Уже в начале сентября в Казани начался монтаж опытных установок для получения жидкого воздуха, а затем и кислорода, эвакуированных вместе с другим имуществом института. Возобновилась и работа на заводе в Москве. Жизнь требовала перехода к установкам промышленного масштаба, поэтому стали вести подготовку к выпуску двух установок, называвшихся в переписке "объектом № 1" и "объектом № 2".

¹ Нужно отметить, что Капица не хуже другого академика – М. В. Ломоносова знал выразительные возможности великого русского языка и умел их использовать не только в письменной форме, но и в устной речи.

² Они впервые были изобретены Д'Арсонвалем и применены Ж. Клодом во время первой мировой войны.

¹ Сам К. Линде был уже очень стар и не принимал активного участия в научных дискуссиях.

В 1942 г. первый экземпляр "объекта № 1" – турбокомпрессорной установки типа ТК-200 производительностью до 200 кг/ч жидкого кислорода был изготовлен и в начале 1943 г. благополучно пущен. Интересно, что запускать ее на длительный срок не было возможности, так как жидкий кислород в таком количестве некуда было сливать. Одновременно в 1942 г. началось проектирование "объекта № 2" – установки типа ТК-2000, в 10 раз большей производительности. Несмотря на явные успехи¹ в упорной "кислородной" деятельности Капицы и его сотрудников при определенной поддержке "сверху", дела шли непустимо медленно. П.Л. Капица писал Молотову: "...далее при такой организации внедрения успеха добиться трудно. Все это время я был погонщиком мулов, а в руке у меня не было не только палки, но даже хворостины. Поэтому полагаю, что в той или иной форме мне нужно дать официальную власть, чтобы я сам мог руководить вопросами внедрения в производство. И тогда, несмотря на то, что мне на это время придется сократить мою научную работу, у меня будет взамен удовлетворение видеть наши установки внедренными".

В конце концов эта идея была принята, и в середине 1943 г. был создан Главкислород, непосредственно подчиненный СНК СССР, а П. Капица назначен начальником этой организации. При ней был образован Научно-технический совет, в задачи которого входило изучение перспективных областей применения кислорода в народном хозяйстве и выработка соответствующих рекомендаций. В 1944 г. начал выходить новый журнал "Кислород", а в одном из вузов Москвы началась подготовка специалистов – инженеров для работы с новыми кислородными и другими криогенными установками. Развернулось широкое "наступление по всему фронту". Несмотря на трудности, было выпущено несколько установок типа ТК-200, которые снабжали кислородом оборонные предприятия в Нижнем Тагиле, Ленинграде и других городах. Наконец в 1944 г. была пущена самая мощная в мире установка по производству жидкого кислорода типа ТК-2000 (объект № 2). Она стала давать в 2 раза больше кислорода, чем все заводы Москвы (1/6 его про-

¹ Они были отмечены награждением большой группы сотрудников "за успешную работу по разработке и внедрению нового метода получения жидкого воздуха и жидкого кислорода". П.Л. Капица был награжден орденом Ленина.

изводства в СССР). Внешне все шло блестяще. Незадолго до Дня Победы, 30 апреля 1945 г., П.Л. Капице было присвоено звание Героя Социалистического Труда и награждена большая группа его сотрудников. П.Л. Капица был полон надежд на новые успешные дела; он написал: "Заключительный аккорд Балашихинской симфонии прекрасен. Давайте следующую, Тульскую симфонию¹ проведем в темпе presto vivo".

Этим надеждам, как и другим планам внедрения кислорода и модернизации промышленности, а также организации научной работы в стране в то время не суждено было осуществиться. Они вступали в явное противоречие с системой, установленной в стране Сталиным и его окружением. П.Л. Капица хотел слишком многого и в верхнем эшелоне власти (не без помощи "доморощенных злопыхателей") все больше зрела мысль, что пора его остановить.

Это было вполне логично. Все академики сидят тихо и работают, выполняя начальственные предписания, а этот все время шумит, лезет в государственные дела с непрошенными советами, пишет письма "на самый верх"... Дали ему даже главк, подчиненный прямо Совету Министров, а он все недоволен...

Кроме общего усложнения ситуации, связанной с необходимостью послевоенного устранения идеологической "крамолы", существенную роль в судьбе Капицы сыграло его противостояние Берии, который был назначен председателем Особого комитета и Технического совета по атомной бомбе. П.Л. Капица, входивший в этот комитет, понимал, как и большинство других его членов, что абсолютно некомпетентный Берия ведет дело далеко не оптимальным образом и мешает физикам и инженерам, затягивает работу, что требует лишних расходов.

П.Л. Капица открыто восстал против Берии. Он написал письмо Сталину с подробным изложением ситуации, предложениями, как ее исправить, и попросил освободить его от работы в Комитете, считая ее в сложившихся условиях бесполезной. Его руководителя он сравнил с неграмотным дирижером. "У тов. Берия основная слабость в том, что дирижер должен не только махать палочкой, но и понимать партитуру. С этим у Берии слабо". Кончалось письмо припиской: "P.S. Мне хотелось

¹ Речь идет о плане перевода домен Новотульского металлургического завода на дутье, обогащенное кислородом.

бы, чтобы тов. Берия познакомился с этим письмом, ведь это не донос, а полезная критика. Я сам бы ему все это сказал, да увидаться с ним очень хлопотно”.

П.Л. Капица был, пожалуй, единственным человеком в стране, который осмелился открыто так отозваться о Берии. Безнаказанно ему это пройти не могло. Но Сталин, опасаясь, по видимому, реакции за рубежом (особенно в Англии), велел Берии не арестовывать Капицу; что касается всего остального, относящегося к его работе, то тут запрет уже отменялся. Это было сформулировано Сталиным так: “Я тебе его сниму, но ты его не трогай” [11]. Берия приступил к делу.

Отдельные нападки на Капицу в виде различных доносов как общего, так и “научного” характера поступали в различные инстанции и раньше, но с весны 1946 г. началось “генеральное наступление”. Все делалось в быстром темпе, поскольку итог был предрешен заранее.

В апреле 1946 г. вышло Постановление Совета Министров СССР “О создании правительственной комиссии”, которая должна была заниматься делами Главкислорода и Капицы. Ее состав комплектовался, естественно, в секрете от него.

Прооба П.Л. Капицы от 20.05.1946 г. о включении в состав экспертной комиссии трех ведущих специалистов – М.П. Малкова, А.И. Мороза и И.П. Ишкина, “присутствие которых содействовало бы объективному выяснению существа вопроса”, была оставлена без внимания, и уже 29.05.1946 г. заключение экспертной комиссии было готово и подписано.

Естественно, это заключение было полностью негативным, без полутонов. Не вдаваясь в научный анализ этого документа (он должен быть темой специальной работы для историков науки и техники), остановимся лишь на нескольких моментах, показывающих, как и из чего он изготавливался.

Предварительно нужно отметить, что два члена комиссии не согласились с его содержанием и выводами; каждый из них представил свое особое мнение. Это были акад. И.П. Бардин и доц. Д.Л. Глизманенко. Такой поступок был в то время очень рискованным и требовал большого мужества, особенно от Глизманенко, поскольку Бардин был в некоторой (правда, не такой уж большой) степени защищен своей мировой известностью.

В ответе на заключение комиссии Капица указал, не говоря уже о научных ошибках, на ряд прямых подтасовок. Рассмат-

ривая, например, сравнение показателей установки фирм “Гейландт” и своей, он выразил удивление “как могла экспертная комиссия оперировать этими данными в официальном заключении, заведомо зная, что этих данных просто не существует”. Далее он показал простым расчетом, что “в собственных исходных материалах экспертной комиссии имеются фактические данные, которые опровергают принятые ею же показатели”.

Далее Капица отмечает некорректность сопоставления различных вариантов техники, испытываемых в неидентичных условиях. Этот фокус часто используется при недобросовестных испытаниях (например, при сравнении двух тракторов – один ставят на тяжелую почву, а другой – на легкую). Именно такой способ сравнения был использован комиссией при оценке кислородной установки типа ТК-2000 (у нее был случайный компрессор, предназначенный для работы при других давлениях).

В заключительной части ответа Капица указал на совершенно классический “финт” ученых экспертов. Стараясь доказать, что турбодетандер фирмы Линде не намного хуже аналогичной машины Капицы, они по данным, полученным немцами при работе на азоте, рассчитали показатели по диаграмме для воздуха (а это совсем не то). В результате такого нехитрого фокуса (Капица деликатно назвал его “ошибкой”) удалось “дотянуть” КПД немецкой машины до 0,75 вместо действительного значения 0,6–0,66. Это все равно хуже, чем у турбодетандера Капицы (0,8–0,82), но все же!

Здесь Капица уже не выдержал официального тона и перешел на “открытый текст”: “Если такие принципиальные ошибки делает студент, его прогоняют за безграмотность. Но если это делают эксперты Правительственной комиссии, по-видимому с желанием получить высший показатель, не имея для этого фактического материала, то я не знаю, как надо оценить их поступок”.

П.Л. Капица, конечно, знал, как надо оценить и этот поступок, и все другие, но право делать выводы принадлежало не ему. И выводы, несмотря ни на что, были сделаны. П.Л. Капица Постановлением Совета Министров СССР, подписанным И.В. Сталиным, был снят не только с поста начальника Главкислорода, но и директора ИФП с мотивировкой: “За невыполнение решений Правительства о развитии кислородной промышленности в СССР, неиспользование существующей передо-

вой техники в области кислорода за границей, а также неиспользование предложений советских специалистов”.

АН СССР тоже показала, на что она способна: "... президиум Академии наук СССР считает, что проводившиеся в течение ряда лет институтом работы, под руководством акад. П.Л. Капицы, по созданию кислородных установок низкого давления не дали положительных результатов – продукт получался не удовлетворительной чистоты, коэффициент полезного действия установок был мал, не был использован опыт заграничной техники в области кислорода..."

Так был надолго выведен из числа действующих один из крупнейших физиков, инженеров и организаторов науки.

П.Л. Капица, оказавшись не у дел и перенеся сильную травму, долго не мог освоиться со своим новым положением. Не работать он не мог – это для него значило не жить. Он не мог как прирожденный экспериментатор "переключиться" на чисто теоретические исследования. Однако спустя несколько месяцев он организовал у себя на даче небольшую лабораторию – "избу физических проблем" и занялся в пределах возможного экспериментами в области гидродинамики и обработкой материалов прежних своих работ. Это, разумеется, было совсем не то: "изба" – не институт.

Но и здесь Капица получал новые удары. Особенно трудными были 1949 и 1950 гг. В июне 1949 г. его выселили из квартиры, которую семья занимала 13 лет; в январе 1950 г. он был освобожден от работы на физико-техническом факультете МГУ, где был заведующим кафедрой, "за отсутствием педагогической нагрузки". В действительности поводом для этого решения послужило то, что Капица не явился на торжественные заседания, посвященные 70-летию Сталина, ни в АН СССР, ни в университет. Несмотря на опалу, он "по чину" должен был на них присутствовать. Ректор МГУ проф. С.А. Христианович в письме на имя Капицы писал так: "...Согласитесь, что нельзя доверять воспитание научной молодежи лицу, которое демонстративно противопоставляет себя всему нашему народу".

П.Л. Капица понимал, что не он один был в таком положении – со многими было еще хуже, но это не могло его успокоить – скорее наоборот. Он переживал не только свои дела, но и вообще судьбу науки в стране.

Наконец, во второй половине 1953 г., когда Сталина уже не было, началась реабилитация Капицы. 28 августа "изба физи-

ческих проблем" получила официальный статус и стала именоваться "Физическая лаборатория АН СССР"; ее руководитель был назначен заведующим этой лабораторией. 15 декабря 1954 г. он был принят Н.С. Хрущевым, а 28 января 1955 г. вновь назначен на прежнее место – директором ИФП. Политическая и научная опала П.Л. Капицы, длившаяся семь лет, закончилась.

"Кислородными делами" и криогеникой Капица больше специально не занимался; он переключился на новую область – электронику больших мощностей.

Что же произошло в области получения и использования кислорода за все это время? Кто в конечном счете оказался прав – Капица или его оппоненты и противники?

Первое время отечественные хулители Капицы торжествовали победу. Испытания его опытных установок были свернуты, а производство серийных прекращено. Был продолжен выпуск старых, сделанных по немецким образцам мелких установок высокого давления, и начато проектирование новых, малых установок для получения газообразного кислорода тоже высокого давления и более крупных систем двух давлений воздуха.

"Тульская симфония", о которой мечтал Капица, была сыграна, но по старым немецким нотам – из Германии была привезена и смонтирована старая трофейная установка Линде-Френкля. Для получения жидкого кислорода стали копировать немецкие установки Гейландта высокого давления воздуха. Правда, учитывая требования поднятой Сталиным псевдопатриотической кампании борьбы против "космополитизма" и иностранщины, все названия этих установок были заменены на условные обозначения (установка Линде-Френкля, например, называлась "КТ-3600").

Спокойная жизнь, однако, продолжалась недолго. Сведения о том, что в США и Франции полным ходом с конца 40-х годов идут работы по созданию установок низкого давления для получения газообразного кислорода, вызывали все большее замешательство и противоречия среди противников Капицы. Все попытки сделать другой, "не капицынский" активный турбодетандер с высоким КПД окончились неудачей. Стало также известно, что вслед за американцами правильность идей Капицы признали и немцы. Фирма Линде с большим почетом отправила на пенсию Г. Хаузена. Отметив его заслуги (которые в свое время были действительно большими), она сменила лидеров и отказалась от систем двух давлений, перейдя на низкое давление воздуха и турбодетандеры Капицы.

Под прикрытием различных вседотеоретических рассуждений (один профессор даже утверждал, что установки Линде-Френкля "являются, конечно, установками низкого давления") был сделан крутой поворот к проектированию крупных установок для получения газообразного кислорода низкого давления с турбодетандерами Капицы. Его фамилия при этом, естественно, не упоминалась, а отличия в схеме и конструкциях, имевшие второстепенный характер и не менявшие основную идею, выдавались за принципиально новые.

Таким образом удалось избежать ответственности за вынужденное отставание; из лидера Советский Союз попал в положение догоняющего. Была с опозданием сыграна и "Тульская симфония", о которой мечтал Капица. Постепенно были отодвинуты в тень и фигуры, сыгравшие ведущую роль в травле Капицы. Наконец в 1956 г., когда советские кислородные установки низкого давления оправдали себя в работе, Капица получил из ВНИИКИМаша¹ просьбу на согласие включить его в коллектив соискателей Ленинской премии за работу "Создание и освоение комплексного оборудования для широкого внедрения технического кислорода в промышленности". Отвечая на это письмо, Капица отметил, что это "лестное предложение" дает "еще одно веское доказательство прогрессивности направления" его прежней деятельности. "Наши идеи и научные результаты, — писал он, — сперва были широко использованы на практике за границей, и таким путем им удалось обогнать нас. Теперь надо опять завоевывать лидерство".

Пожелав коллективу успехов и выразив благодарность и надежду когда-нибудь в будущем "поработать в поисках новых возможностей в решении кислородной проблемы", он все же отказался от этого предложения.

"Кислородная эпопея" акад. П.Л. Капицы (и все связанное с ней) очень поучительна. В ней необычайно четко сконцентрированы события, в частности, иллюстрирующие взаимодействие экономики и научно-технического прогресса с государственной политикой.

Ф. Энгельс в письме К. Марксу от 27.10.1890 г. писал по этому поводу: "Обратное действие государственной власти на эконо-

мическое развитие может быть тройкого рода. Оно может действовать в том же направлении — тогда дело идет быстрее; оно может действовать против экономического развития — тогда у каждого крупного народа она терпит крах после известного промежутка времени; или она может ставить экономическому развитию в определенных направлениях преграды и толкать вперед в других направлениях... Но ясно, что во втором и третьем случаях политическая власть может причинить экономическому развитию величайший вред и породить растрату сил и материала в массовом количестве". Более актуальное высказывание, характеризующее ситуацию, едва ли можно найти. С Капицей (и не только с ним) несомненно был "второй случай" в чистом виде.

В заключение раздела о "кислородных делах" необходимо коснуться еще одного вопроса — в каком состоянии находятся они сейчас, через несколько десятилетий после описанных событий?

Нужно сразу сказать, что прогнозы Капицы (и еще более ранние Д'Арсонваля¹) в основном оправдались. Кислород газообразный и жидкий (так же как и другие продукты разделения воздуха) производится во всем мире в огромных количествах; так, в 1990 г. его выработка составила 146 млн т (в том числе в СССР — 26 млн т). Единичная производительность установок достигает 70 000 м³/ч кислорода. В подавляющем большинстве это делается на основе турбодетандеров Капицы и циклов низкого давления. Турбодетандеры Капицы нашли применение и для охлаждения водорода, гелия и природного газа; интервал давлений, в которых они могут работать, тоже вырос — есть машины среднего и даже высокого давления; КПД некоторых из них превышает 90%.

Конечно, за это время многие частные решения, найденные Капицей и его сотрудниками, уступили место новым или были изменены (адсорбционная очистка и осушка больших масс воздуха, новые эффективные теплообменные и ректификационные аппараты, тепловая изоляция, насосы и трубопроводы ожиженных газов и др.). Однако основа осталась неизменной.

¹ Он писал в 1903 г. (!): "Ожижение воздуха в промышленном масштабе является не только революцией в науке, но также, и при том главным образом — революцией экономической и социальной". Здесь есть, конечно, некоторое преувеличение, но оно вполне объяснимо.

¹ Всесоюзный научно-исследовательский институт кислородного машиностроения (организован Капицей в 1945 г.).

Кислород, как газообразный, так и жидкий, используется для интенсификации технологических процессов в металлургии, нефтяной промышленности, химии, биологической и других отраслях промышленности, в авиации, космонавтике, медицине, транспорте и т.п.

В большинстве развитых стран основная часть кислорода производится централизованно, на крупных установках и по трубопроводам передается потребителям на десятки и сотни километров. Часть кислорода хранится (и транспортируется) в жидком виде. Такие изолированные хранилища с голубой жидкостью описал в известном научно-фантастическом романе "Продавец воздуха" А. Беляев [15]. Теперь они стали реальностью¹.

Чеховский персонаж, не соглашавшийся с утверждением, что "без кислорода жить невозможно", был явно неправ.

Чтобы подробно перечислить все области его применения – нужна целая глава, а для описания этих применений – не одна книга. Но это уже другая тема; теперь же нужно вернуться к общей криогенике.

8.2. ОТ "МАКРО"- К "МИКРО"КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКЕ

С расширением круга потребителей криогенной техники возникла тенденция к ее специализации. В наибольшей степени она сказалась на развитии криорефрижераторов. Разным потребителям требовались не только разные температуры – от ультранизких до менее низких, лежащих на границе с температурой, используемой в холодильной технике². Необходимы были и разные холодопроизводительности и размеры установок. Каждому заказчику нужно было свое. Медики, например, требовали создать инструмент в виде теплого гибкого шланга с холодным наконечником, который смог бы проникнуть в пищевод пациента и заморозить, например, опухоль в желудке.

¹ В этом книге есть еще много уже сбывшихся прогнозов, вплоть до дыхания воздухом, обогащенным кислородом для лечебных целей.

² Специализация коснулась и холодильной техники, но там различия в температурном уровне и производительности не вели к качественным изменениям в принципах действия и конструкций.

Инженеры, работающие над космическими объектами, желали получить криогенные установки, работающие несколько лет без обслуживания на каком-нибудь летающем телескопе; если же они предназначены для корабля, все равно "с ними возиться некому, космонавтам и так хватает дела". Электронщикам нужно было криостатировать свои приборы, но так, чтобы в рефрижераторе ничего не тряслось, не вибрировало и не булькало, а запускался бы он за одну минуту...

Наряду с такими "микро"требованиями появились и "макро"-заказы – обеспечить, например, за короткое время сотни тонн жидкого кислорода или водорода для заправки двигателей ракет или оживить огромные потоки природного газа для заливки в танки судов, перевозящих сжиженный газ, либо в хранилища для последующей газификации в нужное время.

Эти и многие другие требования постоянно сопровождались (и сопровождаются теперь) еще двумя условиями – чтобы все было недорого и расход энергии был минимальным¹.

О том, как решаются задачи с "макрокриогеникой", уже рассказывалось как в предыдущих главах, так и в § 8.1 гл. 8. Крупные системы на турбомашинах и другом оборудовании, в частности теплообменном, специально приспособленном для больших расходов, дают возможность наращивать мощности до любых нужных значений; хранилища охлажденных газов тоже могут быть доведены до требуемой вместимости. Что касается миниатюризации, необходимой для создания микрокриогенных установок, то при этом понадобились качественно новые, во многом оригинальные решения. Одни из них основывались на процессах, вообще не применявшихся ни в криогенике, ни в других областях техники, другие – на хорошо известных процессах, но в совершенно новых модификациях. Это направление криогеники оказалось более подвижным и восприимчивым к новым идеям, потому что их экспериментальная проверка и доводка, как говорят, "до ума" может быть проведена быстрее и с меньшими затратами, чем те же операции в макрокриогенике, где нужны годы и миллионные затраты.

Наиболее интересными и плодотворными в микрокриогенике оказались два направления: обратные циклы Стирлинга

¹ Иногда заказчики так увлекаются, что требуют обеспечить расход энергии меньше теоретически возможного (см. табл. 2.1), и возмущаются, когда им отказывают. Даже довод о том, что КПД не может быть выше 100%, не убеждает.

и дроссельные системы на смесях. Каждое из них привело к созданию целого ряда криорефрижераторов малой мощности.

Первое из них имеет длинную историю и может служить классическим примером возрождения и трансформации на новой основе идей, опередивших свое время и поэтому не реализованных.

Роберт Стирлинг (1790–1878 гг.) – шотландский пастор, доктор богословия, вошел в историю не как выдающийся деятель церкви, а как изобретатель и инженер. Газета "Таймс" в некрологе, посвященном его памяти, с некоторым сожалением отмечала, что он не оставил "ни одного богословского произведения".

Работая в свободное от основных обязанностей время вместе со своим братом над тепловыми машинами, он изобрел новый двигатель, названный впоследствии его именем.

В 1816 г. он получил патент (№ 4081) на машину, которая "производит движущую силу посредством нагретого воздуха", а в 1827 и 1840 гг. – еще два (№ 5456 и 8652) на усовершенствованные ее варианты. В 1845 г. на литейном заводе в Ланди была пущена машина Стирлинга мощностью 50 л.с. (36,7 кВт), проработавшая больше трех лет.

Долгое время после этого двигателя Стирлинга не строились, а его работы были почти полностью забыты. Только в 1938 г. началось "возрождение" двигателей Стирлинга, и сейчас над ними работают во всем мире.

Все это очень интересно как для истории, так и для определения тенденций современного развития тепловых двигателей. Но какая здесь связь с криогенной техникой, где все наоборот? Оказывается, как ни странно, что самая непосредственная.

Нельзя и тут не вспомнить А.С. Пушкина: "...лед и пламень не столь различны меж собой..."

Чтобы увидеть, как проявляется эта связь в данном случае, необходимо разобраться в том, как работает двигатель Стирлинга. Прежде всего нужно отметить, что он принципиально отличается от паровой машины двумя особенностями. Во-первых, он работает не на воде и водяном паре, а на воздухе; другими словами, этот двигатель газовый (в том смысле, что агрегатное состояние его рабочего тела не меняется – нет ни испарения, ни конденсации). Во-вторых, все процессы изменения параметров рабочего тела проходят полностью в цилиндре

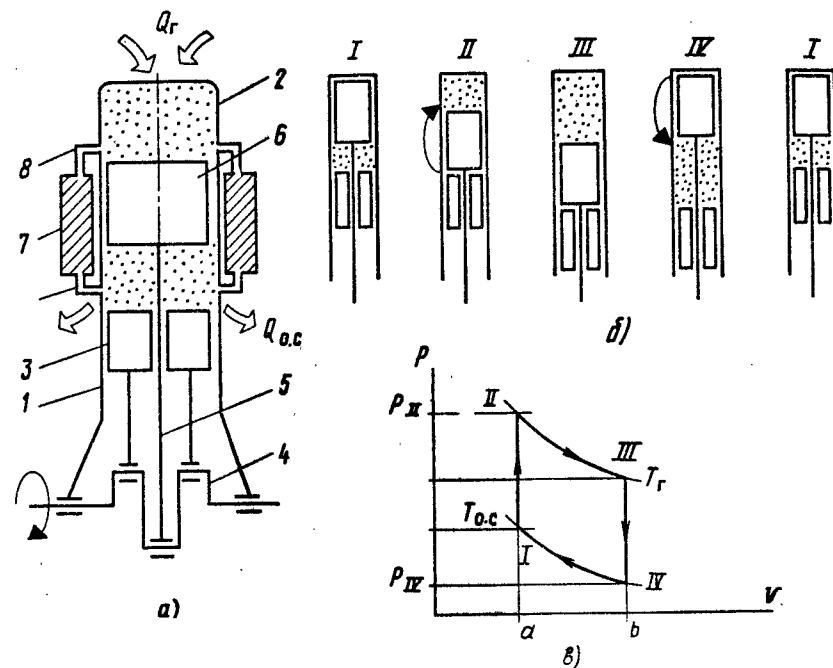


Рис. 8.3. Принцип действия двигателя Стирлинга:

а – конструктивная схема двигателя; б – положения поршня и вытеснителя в разных фазах процесса; в – процесс на диаграмме p, v

машины; воздух из него не выпускается и в него не впускается; поэтому никаких распределительных устройств, вроде клапанов или золотника, в нем нет.

На рис. 8.3, а показан схематический разрез двигателя, на рис. 8.3, б – положение рабочих органов в четырех исследовательских положениях. Цилиндр 1 двигателя имеет головку 2, которая постоянно поддерживается в горячем состоянии, так как омывается снаружи продуктами сгорания топлива. В нижней части цилиндра, охлаждаемой водой или воздухом, помещен рабочий поршень 3, связанный с коленчатым валом 4. Через отверстие в поршне пропущен шток 6 (элемент, который закреплен так называемый вытеснитель 6 (элемент, который определяет основные особенности двигателя Стирлинга). Он представляет собой тоже поршень, который может перемещаться в цилиндре с небольшим радиальным зазором. Управление его движением осуществляется от того же вала 4.

Проследим работу двигателя. В фазе *I* и поршень, и вытеснитель расположены каждый в своей верхней мертвой точке. Воздух находится в промежутке между ними и имеет температуру, близкую к $T_{о.с.}$, так как соприкасается со стенками холодной части цилиндра. Затем вытеснитель перемещается вниз, придвигаясь вплотную к рабочему поршню (фаза *II*). Воздух при этом переходит по кольцевому зазору между вытеснителем и цилиндром в горячую головку цилиндра, где нагревается. При этом его давление возрастает, он давит на поршень и, расширяясь, смещает его вниз, производя работу, передающуюся на вал машины. Вытеснитель посредством штока тоже сдвигается вниз вслед за поршнем; оба оказываются в самом нижнем положении (фаза *III*). Далее вытеснитель перемещается снова в самое верхнее положение (фаза *IV*). При этом расширившийся воздух переталкивается через зазор между вытеснителем и цилиндром снова в нижнюю холодную часть цилиндра. При понижении температуры воздуха его давление падает, и поршень снова вдвигается в цилиндр до верхнего положения, соответствующего фазе *I*; на этом цикл завершается, и все повторяется сначала.

Таким образом, блестящая идея Стирлинга сводилась к тому, чтобы периодически с помощью придуманного им простого устройства – вытеснителя переталкивать газ из холодной зоны цилиндра в теплую и обратно. Остальное совершалось автоматически: при нагревании давление газа повышалось, и он давил на поршень, производя работу, а при охлаждении – понижалось, и поршень вдвигался обратно. Работа определялась разностью между той работой, которая отдавалась на вал при расширении горячего воздуха (движение поршня вниз), и той, которая затрачивалась при сжатии холодного (движение поршня вверх). На передвигание вытеснителя работа почти не тратилась, так как он двигался почти без сопротивления (воздух легко проходил через зазор между ним и цилиндром, поэтому давления над ним и под ним мало различались).

На рис. 8.3, в помещена диаграмма, показывающая, как изменяется объем v и давление p газа (воздуха) при работе машины. Процессы переталкивания (*I–II* и *III–IV*) проходят при неизменных объемах (изохорно), а расширение при высокой температуре T_r (*II–III*) и сжатие при низкой $T_{о.с.}$ (*I–II*) – при неизменных температурах T_r и $T_{о.с.}$. Площади на диаграмме соответственно равны: $aIIIb$ – работе L_{I-III} , отдаваемой поршнем, $bIVa$ – рабо-

те L_{IV-I} , затрачиваемой на его возвращение, а их разность (площадка *IIIIIIV*) $L_{II-III} - L_{IV-I}$ – полезной работе машины.

В связи с изобретением вытеснителя Стирлинг впервые ввел в технику и другое устройство, которое затем "оторвалось" от машины Стирлинга и "зажило самостоятельной жизнью", проникнув во многие отрасли техники. Более того, люди забыли не только о том, откуда оно появилось, но и фамилию того, кто его изобрел. Этим устройством является тепловой регенератор (или регенератор тепла). Началось с того, что Стирлинг заметил: при работе его двигателя воздух, проходя через кольцевой зазор между вытеснителем и цилиндром из холодной зоны в горячую и обратно, в первом случае несколько нагревался, а во втором – охлаждался. Причина этого была очевидна: горячий воздух, проходя в зазор, нагревал как стенку цилиндра, так и вытеснитель, а сам охлаждался; холодный воздух, напротив, встречаясь с горячими стенками, нагревался, охлаждая их, и т.д.

Оба эти процесса были очень полезны. Действительно, если бы холодный воздух без этого подогрева сразу попадал в горячую зону, то пришлось бы дополнительно затрачивать тепло для его нагрева в процессе *I–II*. Соответственно пришлось бы понижать температуру горячего воздуха в процессе *III–IV* за счет внешнего охладителя. Регенеративный теплообмен в зазоре между вытеснителем и стенкой цилиндра позволяет проводить процесс нагрева *I–II* за счет охлаждения в процессе *III–IV*. Чтобы этот процесс теплообмена шел по возможности полнее, Стирлинг обмотал цилиндрическую поверхность вытеснителя проволокой, которая омывалась воздухом и служила дополнительной массой, аккумулирующей тепло, как впоследствии насадка в регенераторах Френкля. В дальнейшем тепловой регенератор 7 был вынесен за пределы цилиндра, как показано на рис. 8.3, а, и соединен трубками 8 с горячей и холодной полостями. Такая конструкция позволяла как облегчить вытеснитель, так и сделать регенератор нужного размера. Вытеснитель при этом двигался в цилиндре с минимальным зазором и прогонял воздух из одной полости в другую через кольцевой регенератор. Машина-двигатель Стирлинга превзошла по КПД лучшие паровые машины того времени. Но... верхняя горячая часть цилиндра быстро прогорала, и машина выходила из строя. Паровые машины, более приспособленные к технологии того времени, постепенно совершенствовались, затем

появились двигатели внутреннего сгорания... К началу нашего века и сам Стирлинг, и его машина были совершенно забыты. О них не вспоминали даже историки теплотехники.

Возрождение интереса к работам Стирлинга связано со временем второй мировой войны. В Голландии, как и во всей Центральной Европе, оккупированной немцами, ощущался острейший недостаток жидкого топлива. В частности, его не хватало для армейских "движков" – маленьких двигателей, предназначенных для электрогенераторов передвижных радиостанций. Инженеры фирмы "Филипс", выпускавшей это оборудование, нашли выход, вспомнив о двигателе Стирлинга. Действительно, головку этой машины можно обогревать, используя любое низкосортное топливо; такие двигатели, снабженные самой простой топкой, но сделанные на уровне вполне современной технологии, исправно работали (в дальнейшем они послужили базовой моделью для более мощных и совершенных "стирлингов"). У фирмы возникла необходимость в небольших установках для производства жидкого азота. Инженеры фирмы не стали использовать традиционные установки Линде и Клода, а пошли своим собственным, оригинальным путем. Они решили пустить машину Стирлинга "наоборот", чтобы, превратив в криогенную и используя только ее, сразу получить низкую температуру, необходимую для ожижения воздуха.

Идея "обращения" машины Стирлинга оказалась на редкость удачной и дала блестящий результат. Это и естественно: обе машины Стирлинга – двигатель и вновь созданная криогенная – очень похожи. Они соотносятся между собой, как поршневые компрессор и детандер.

Начнем рассмотрение процессов с фазы IV (рис. 8.4, б). Сжатый газ находится в головке цилиндра, а поршень – в верхней мертвой точке. Затем при движении их вниз до фазы I газ расширяется, отдавая работу и охлаждаясь. После этого вытеснитель, переходя вверх, переталкивает газ в нижнюю, теплую полость. При этом в процессе II–III газ сжимается, и тепло, выделяющееся при этом, отводится в окружающую среду. После этого вытеснитель смещается вниз, возвращая сжатый газ в холодную полость (фаза IV). Затем снова происходит расширение с отдачей внешней работы (процесс IV – I), при котором газ охлаждается, и т.д. Другими словами, можно сказать, что машина работает как компрессор, когда газ находится в нижней полости, и как детандер, когда он перемещен

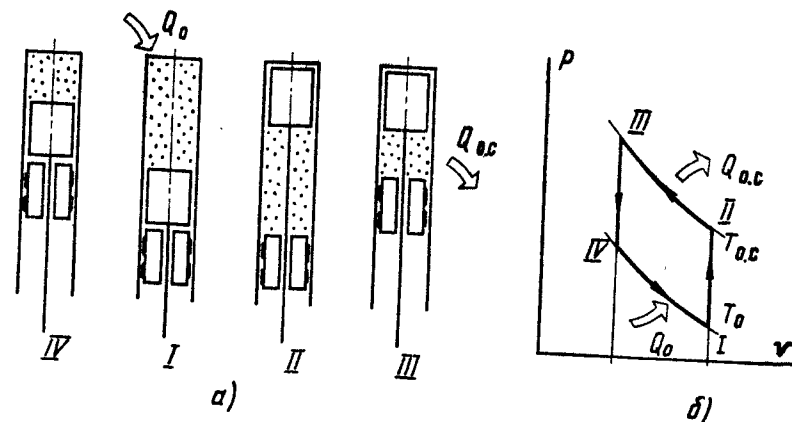


Рис. 8.4. Работа машины Стирлинга в криогенном варианте (обратный цикл Стирлинга)

в холодную полость. Поршень выполняет роль компрессорного, когда движется вверх, и детандерного, когда движется вниз. Клапанов, которые регулируют в обеих машинах впуск и выпуск газа, здесь нет. Зато есть "диспетчер" – вытеснитель, который в нужные моменты перегоняет газ из теплой полости в холодную и обратно.

На рис. 8.4, а показаны, так же как и на рис. 8.3, б, четыре фазы работы машины Стирлинга в криогенном варианте. Диаграмма p-v процесса, показанная на рис. 8.4, б, та же, что и у двигателя, лишь направление процессов противоположное (не по часовой стрелке, а против нее). Тепловые потоки тоже направлены в противоположную сторону.

Уже первые образцы криогенных машин Стирлинга показали высокую эффективность: их КПД достигал 35–40%, что является хорошим показателем для машин такого класса. Разумеется, пришлось преодолеть многие трудности – с приводом поршня и вытеснителя, тепловой изоляцией, герметичностью, смазкой и т.п. Воздух в качестве рабочего тела при низких температурах уже не годился – он был заменен гелием. Выпущенные на рынок, они долгое время шли под названием "машин Филипса", но затем аналогичные машины стали изготавливаться и в других странах мира; тогда имя Стирлинга было им возвращено. Особое распространение получили миниатюрные машины Стирлинга, предназначенные для криостатирования различных электронных приборов.

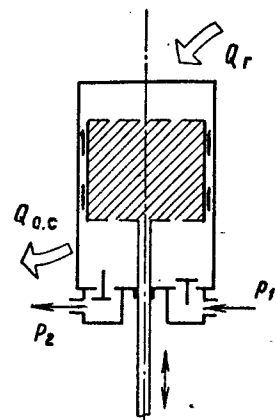


Рис. 8.5. Схема термокомпрессора

ров. С таких машин холодопроизводительностью до долей ватта, которые могли устанавливаться на самолетах, космических станциях и спутниках, и началась, собственно, микрокриогенная техника. Разрабатывались все новые их модификации: многоступенчатые, позволяющие получать низкие температуры вплоть до гелиевых; конструкции с клапанами, позволяющими отделить вытеснитель от рабочего поршня и разместить их далеко один от другого, связав только трубками;

с мембраной вместо поршня; с регенератором внутри вытеснителя, и даже вообще без вытеснителя, где его роль играл столб газа, и др.

Пошло даже до того, что были созданы установки вообще без механического компрессора, замененного тепловым. Такой тепловой компрессор, который тоже, по существу, работает на "вытеснительной" идее Стирлинга, может как входить в криогенную машину, так и монтироваться отдельно. Схема его показана на рис. 8.5. Он представляет собой цилиндр с клапанами, в котором находится вытеснитель с регенератором внутри. Один конец цилиндра нагревается, другой охлаждается. Если вытеснитель находится в теплой зоне, весь газ сквозь регенератор проходит в холодную зону, его давление падает, и в цилиндр через впускной клапан всасывается газ. Затем он переталкивается вытеснителем в теплую зону, где нагревается. Давление при этом растет, и сжатый газ через выпускной клапан поступает к потребителю.

Р. Стирлинг еще в 70-е годы прошлого века предсказывал широкое распространение своих машин в будущем, но он, разумеется, не мог предположить, что вслед за двигателем появится и столь "многодетная семья" низкотемпературных машин Стирлинга.

История с изобретением Стирлинга – классический пример возрождения через многие годы и расцвета старой, почти забытой, но глубокой идеи на новом уровне технологии и потребностей общества.

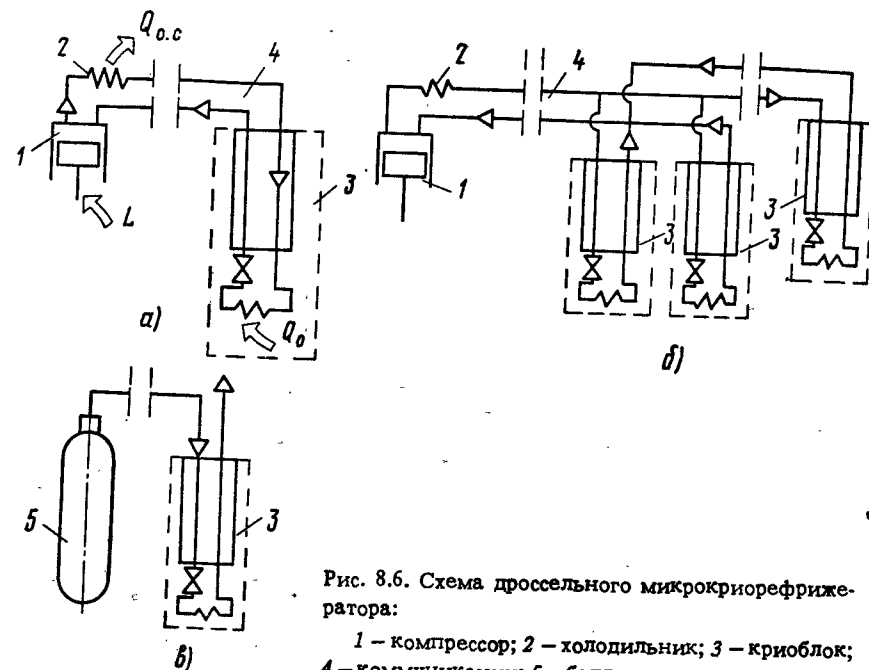


Рис. 8.6. Схема дроссельного микрокриорефрижера:

1 – компрессор; 2 – холодильник; 3 – криоблок; 4 – коммуникация; 5 – баллон со сжатым газом

При всех достоинствах криогенных машин Стирлинга они не могли решить всех задач, возникающих у потребителей. Нужны были и другие микрокриогенные устройства, более простые (и следовательно, более надежные), исключаящие вибрации в холодной части и, в идеале, не имеющие вообще движущихся частей. В этой связи возникла мысль, тоже основанная на возвращении к старому, казалось бы, уже почти оставленному методу. Таким, достойным возрождения на новом уровне, оказался дроссельный цикл Линде. Несмотря на то что для него требовалось высокое давление рабочего тела, подкупала простота: в холодной части нужны только дроссель и теплообменник (рис. 8.6). Нужен был и компрессор высокого давления для сжатия газа. Однако компрессор мог быть помещен на достаточно большом расстоянии от криоблока (дросселя и теплообменника), так как их соединяли две теплые трубки (рис. 8.6, а). Кроме этого, один компрессор мог обслуживать несколько криоблоков, что создавало большие удобства для устройства, где низкие температуры нужно поддерживать в нескольких точках (рис. 8.6, б). Наконец, во мно-

гих случаях можно было и вообще обойтись без компрессора, а использовать баллон со сжатым газом (рис. 8.6, е). Такие расходные системы могут работать при малой мощности часами, после чего баллон заменяется на новый. Часто бывает нужно включать установку один или несколько раз в сутки или (во многих космических объектах) еще реже. В этом случае один баллон может служить довольно долго.

По всем этим причинам дроссельные микросистемы криостатирования получили, наряду с криорефрижераторами Стирлинга, довольно широкое распространение. Рабочим телом в них служили азот, аргон, метан; они обеспечивали получение температур в интервале от 78 до 120 К. Однако при всех их достоинствах КПД дроссельных систем был ниже, чем у "стирлинговых" в 2–4 раза, а расход энергии при тех же условиях соответственно во столько же раз выше.

Четвертый (и последний) научный комментарий. Нельзя ли найти путь существенного повышения КПД дроссельных систем? Это считалось в принципе невозможным без использования дополнительного охлаждения (как это сделал Линде) или детандера (как сделал Клод)¹. Без этого разность температур на холодном конце теплообменника неизбежно должна быть больше, чем на его теплом конце.

Если расхождение температур на холодном конце теплообменника неизбежно следует из свойств рабочего тела, то, казалось бы, изменить тут ничего невозможно, ибо, как справедливо сказал А. Эйнштейн, "обмануть природу нельзя". Скептики (и лентяи) очень любят это изречение, но они обычно не знают (или опускают) вторую его часть: "...но договориться с ней можно". Естественно, такой договор может быть заключен только при соблюдении ее законов. В каждом случае при решении новой инженерной задачи нужно найти тот самый закон, который позволит "договориться с природой" так, чтобы обойти трудности и получить нужный результат.

В середине 60-х годов группе сотрудников Московского энергетического института (МЭИ) и Института микрокриогенной техники в Омске удалось это сделать [4]. Мысль о том, как обойти неблагоприятное отношение теплоемкостей $c_{p,m}$ и $c_{p,n}$, появилась в процессе экспериментов с дроссельными сис-

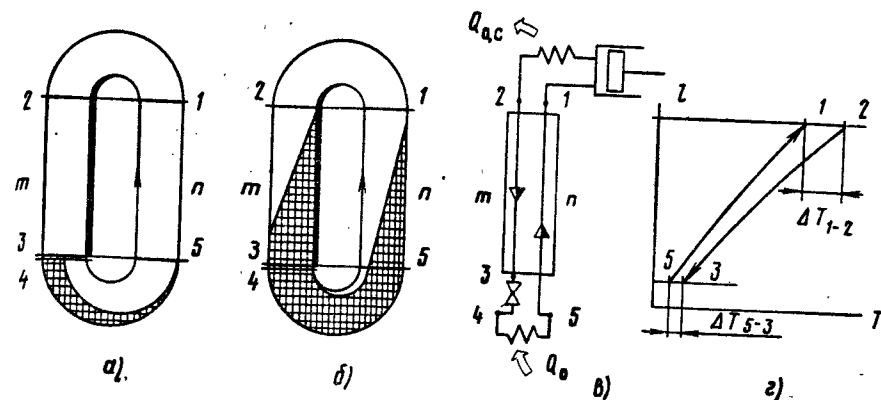


Рис. 8.7. График, показывающий изменение агрегатного состояния рабочего тела в цикле Линде (заштрихованная часть полосы соответствует жидкости, незаштрихованная — газу):

а — чистое рабочее тело; б — смесь; в — схема процесса; г — график протекания температур в теплообменнике

темами, где рабочими телами были не чистые вещества, а их смеси. Ведь можно подобрать состав рабочего тела так, чтобы оно в прямом потоке не только охлаждалось, но и частично конденсировалось, а в обратном не только нагревалось, но и испарялось. В этом случае жидкость образуется не при дросселировании, а раньше, в теплообменнике, как показано на полосовом графике рис. 8.7. Это является главным отличием, которое связано с тем, что теперь в теплообменнике от прямого потока отбирается не только тепло, определяемое его охлаждением, но и тепло конденсации $r_{км}$. Соответственно обратному потоку передается и тепло $r_{ин}$, связанное с его испарением. Между ними существует связь, обратная той, которая существует между теплоемкостями. Если $c_{p,m} > c_{p,n}$, то $r_{км} \ll r_{ин}$. Другими словами, теплота парообразования (а следовательно, и конденсации) тем меньше, чем выше давление. Подбирая соответственно составы смешанного рабочего тела, можно добиться нужного закона изменения разности температур вдоль теплообменника и получить перед дросселем в точке 3 температуру T_3 , очень близкую к T_5 . Дроссель в этом случае будет работать с малыми потерями, и простая установка в целом делается в несколько раз более эффективной; ее КПД стано-

¹ Об этом было рассказано в гл. 4.

вится выше, чем у тех, более сложных, где есть дополнительное охлаждение или детандер.

Практически это означает, например, что установка с баллоном работает на смеси при прочих равных условиях в 4–5 раз дольше, чем на азоте. Компрессорная установка соответственно потребляет во столько же раз меньше энергии. Сейчас в микрокриогенике дроссельные системы на смесях практически полностью вытеснили установки на чистых веществах. Простейший цикл Линде приобрел в этих условиях "второе дыхание" и стал существенно эффективнее, чем более сложные циклы с дополнительным охлаждением или детандером. Классические трубчатые теплообменники, которые ведут начало еще с разработок Хэмпсона (см. гл. 3), удалось сделать очень компактными. Весь криоблок состоит из теплообменника, помещенного в небольшой сосуд Дьюара. На холодном конце теплообменника помещается объект (прибор, приемник излучения и др.). Установка комплектуется либо небольшим компрессором, либо баллоном со смесью сжатых газов, соединенных с криоблоком. В первом случае для этого необходимы две трубки – одна для сжатого рабочего тела (от компрессора), другая – для расширенного (к компрессору); во втором – только одна – от баллона, поскольку расширенный газ выпускается прямо в атмосферу или космическое пространство.

Когда криостатируемый объект или очень мал, или совсем не выделяет тепла (в последнем случае нужно только отводить теплопритоки через низкотемпературную изоляцию), холодопроизводительность микрофрижера очень небольшая. Это означает, что при работе нужно расходовать очень немного сжатой газовой смеси.

При малых, измеряемых кубическими сантиметрами в час расходах рабочего тела даже такие "карандашные" теплообменники оказываются слишком громоздкими. В нашей стране и США разработаны для таких систем миниатюрные теплообменники принципиально новой конструкции, получившие название "планарных". Они изготавливаются из трех стеклянных пластинок, в двух из которых посредством лазерной или другой соответствующей технологии вырезаны каналы – один для прямого, сжатого потока, другой – для обратного расширенного (рис. 8.8). Затем пластинки склеиваются, причем для перехода рабочего тела из прямого потока в обратный в сред-

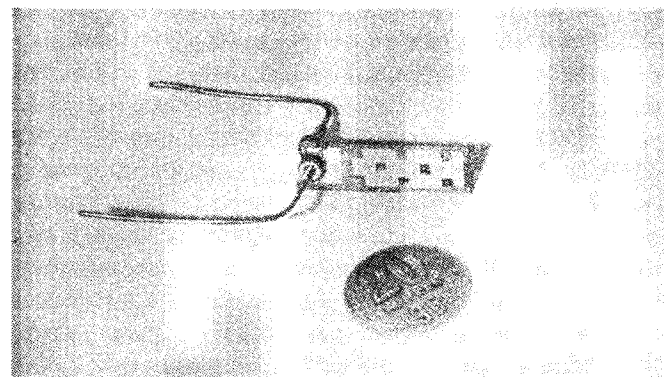


Рис. 8.8. Планарный микротеплообменник

ней пластинке делается калиброванное отверстие, играющее роль дросселя. Эта же пластинка служит и теплопроводной стенкой, через которую тепло передается от прямого потока к обратному. Начальная часть канала для обратного потока используется как испаритель. Криостатируемый объект (например, пленка) приклеивается или напыляется снаружи к холодной части пластинки обратного потока напротив испарителя.

Электронщики, радиотехники и физики получили, таким образом, возможность охлаждать и поддерживать при заданной низкой температуре любые приборы и их элементы, как бы малы они ни были. Микрокриогенная техника может обслужить их "на земле, в небесах и на море".

В начале § 8.2 уже упоминалось, что наряду с многочисленными техническими областями микрокриогеника нашла применение и в самой гуманной области человеческой деятельности – медицине.

Идея ее использования возникла не на пустом месте. Холод издревле применялся для лечения. Это был, конечно, не "крио" уровень температур. Здесь действовало то правило, которое можно было наблюдать по ходу истории холода: как только удавалось получить более низкую температуру, так через некоторое время возникали и новые области ее применения.

Еще за 2500 лет до н.э. в Древнем Египте для лечения переломов костей черепа и ранений грудной клетки применяли холодные компрессы. Интересно, что это было там же, где

впервые нашли способ искусственного охлаждения! Позже "отец медицины" Гиппократ, написавший в одном из своих медицинских трактатов, что "холод и помогает и убивает", описывал лечебный эффект местного охлаждения. В более поздние времена нашли медицинское применение и более низкие температуры. Началось с того, что более 100 лет назад для обезболивания при хирургических операциях стали применять охлаждение эфиром, который испарялся, создавая местное понижение температуры. Отметим, что это происходило примерно в то же время, когда началось использование эфира для той же цели в компрессорных холодильных установках. Тогда же появился и термин "замораживание" для обозначения местной анестезии.

Главный хирург Наполеона заметил во время похода в Россию, что после того, как раненые солдаты долго пролежали на снегу, можно было почти безболезненно производить ампутацию поврежденных конечностей.

Наш выдающийся хирург С. С. Юдин отмечал резкое уменьшение частоты послеоперационного нагноения ран после анестезии холодом.

Другое низкотемпературное направление в медицине (так называемая гипотермия) появилось в начале 30-х годов. Идея возникновения гипотермии была подсказана многократными случаями удавшегося оживления утопленников через 30 мин (или даже больше) после того, как они ушли под воду. Обычно смерть необратимо наступает в таких случаях через 4–5 мин. Но если вода холодная...

"18-летний Бриан Каннингхэм провалился под лед замерзшего озера в штате Мичиган; его вытащили только через 38 мин без малейших признаков жизни. Но юноша все же выжил и сейчас продолжает успешно учиться в колледже". Такое сообщение было помещено в американском журнале "Тайм". Известны и другие такие же случаи.

Развитие низкотемпературной техники позволило проводить такие процессы охлаждения искусственно по точно заданной по времени программе. Охлаждение организма человека может быть как общим, так и локальным. Это позволило проводить длительные и сложные операции головного мозга, сердца и других органов. После окончания операции производится постепенный отогрев и восстановление всех жизненных функций.

Однако самый существенный шаг в область низких температур произошел в хирургии еще через 30 лет в начале 60-х годов. В США, а затем в СССР и других странах были произведены первые криохирургические операции на головном мозге, далее этот метод стал получать все большее распространение. Он основан на том, что даже кратковременное воздействие криотемператур (от -150°C и ниже) на живые биологические ткани безболезненно производит их локальную деструкцию – разрушение, не повреждая соседние органы и ткани. Очаги криодеструкции сравнительно быстро заживают. Говоря простым языком, это означает, что нежелательное образование на теле человека – от невинной бородавки до опасной опухоли – может быть необратимо уничтожено и удалено без вреда для организма и почти без боли и последующих осложнений. Появилось целое направление – *криомедицина*, которая потребовала вначале совсем нехитрые криоинструменты, а затем все более сложные.

Одним из первых был предельно простой, но очень эффективный инструмент для операций на подкорковых структурах головного мозга. Он был сконструирован и изготовлен в ИФП в 1962–1963 гг. под руководством А. И. Шальникова. П. Л. Капица поддерживал эту работу, продолжавшую в определенной степени прежние криогенные традиции института.

Разрез этого устройства и его фрагменты показаны на рис. 8.9. Прибор действовал посредством жидкого азота, который заливали в пенопластовый резервуар, служивший одновременно и рукояткой, которой оперировал хирург. Жидкий азот поступал по тонкой трубке в медный наконечник, испарялся там, а пар по наружной концентрической теплоизолированной трубке выводился наружу.

С 60-х годов криоинструменты для хирургии значительно усовершенствовались, а их ассортимент расширился. Появились и такие, которые размещались на конце гибкого теплого шланга и могли вводиться, например, в пищевод (или другую внутреннюю полость), чтобы выморозить определенное вредное новообразование. Такой инструмент показан на рис. 8.10. Микрофрижидатор Линде того типа, о котором уже шла речь раньше, закреплен на конце гибкого трубопровода. По внутренней трубке идет сжатый газ (смесь), а по наружной – расширенный газ. Компрессор (или баллон со сжатым рабочим телом) расположен рядом на специальной стойке, где сосредоточена вся

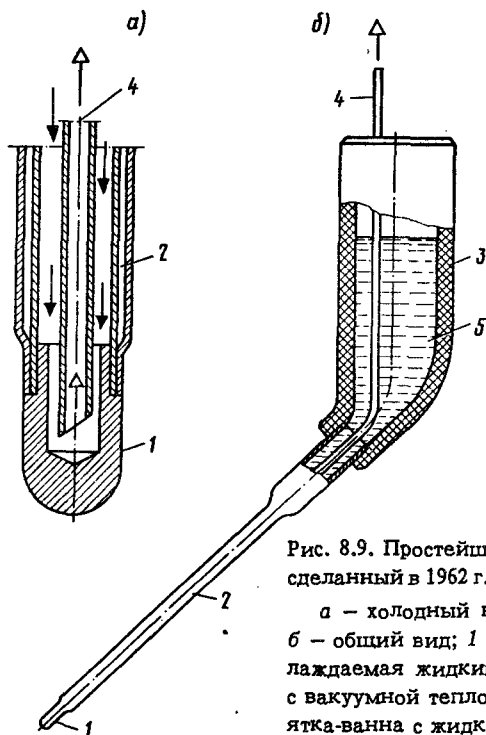


Рис. 8.9. Простейший криоинструмент — деструктор, сделанный в 1962 г. в ИФП:

а — холодный наконечник в увеличенном виде; б — общий вид; 1 — рабочая часть инструмента, охлаждаемая жидким азотом; 2 — двустенная трубка с вакуумной теплоизолирующей полостью; 3 — рукоятка-ванна с жидким азотом; 4 — трубка для отвода испарившегося азота; 5 — жидкий азот

измерительная и управляющая аппаратура. Для таких инструментов жидкий азот не нужен. Таким образом, внутри пациента помещается весь криоблок цикла Линде, включая теплообменник, дроссель, испаритель и тепловую изоляцию. Такую возможность едва ли мог предвидеть доктор К. Линде!

В дальнейшем криоинструменты стали комплектовать волоконной оптикой с осветителем, чтобы хирург мог видеть, что происходит внутри пациента при операции, и другими приспособлениями (например, одновременно и для ультразвукового воздействия). Но это уже не наша область; сейчас нужно вернуться от малой к большой криогенике. Здесь другие масштабы, вплоть до космических.

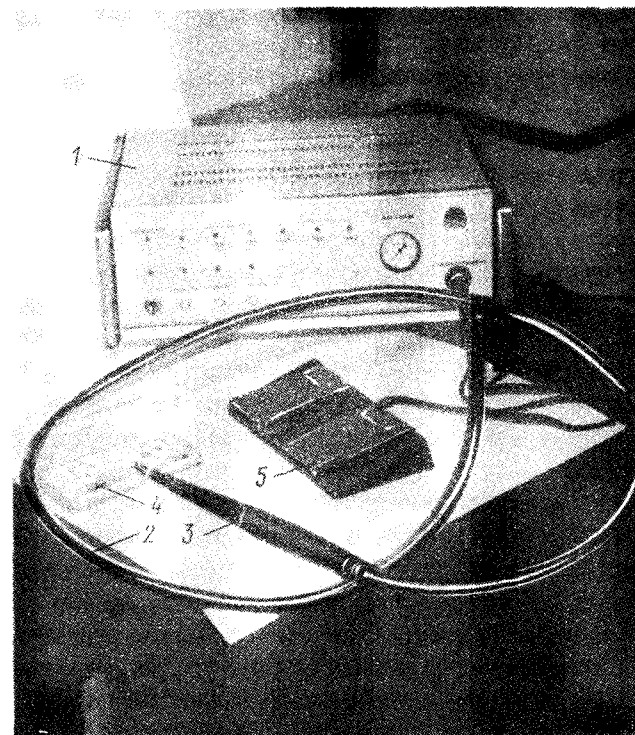


Рис. 8.10. Медицинский криоинструмент с гибким теплым шлангом для операций на внутренних органах:

1 — пульт управления; 2 — гибкий шланг; 3 — рабочий инструмент с охлаждаемым наконечником и теплообменником, находящимся внутри рукоятки; 4 — набор сменных холодных наконечников разной формы и размеров; 5 — ножная педаль для текущего регулирования температуры

8.3. КОСМОС И НИЗКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

О каком бы направлении науки или отрасли техники ни шел разговор в наше время, он очень часто так или иначе связывается с космосом. Это и неудивительно — человечество уже вступило в начало космической эры, и такая связь неизбежно проявляется.

Понятия "космос" и "низкие температуры" поставлены рядом не напрасно. К такому сопоставлению ведет не только человеческая деятельность, связанная с выходом в космос; их соединила сама природа.

Прежде всего нужно вспомнить, что в космосе (конечно, в тени, а не под лучами Солнца) очень холодно. Там господствуют температуры всего на несколько градусов выше абсолютного нуля.

Первым, кто это понял, был великий химик и физик А. Лавуазье. Вспомним часть его знаменитого предсказания, которое приводилось еще в гл. 1 этой книги: "Если бы Земля попала внезапно в среду с очень низкой температурой, подобной, например, температуре Юпитера или Сатурна, вода, которая образует теперь наши реки, моря, и, вероятно, значительное большинство известных нам газов и жидкостей превратились бы в горы и твердые скалы..." Толькс теперь стало ясно, насколько был прав Лавуазье. Оказалось, что далекие планеты и их спутники – это гигантские криокладовые, о которых мы действительно, как он писал далее, "не имели никакого понятия".

Американские космические станции "Вояджер-1" и "Вояджер-2", запущенные к дальним планетам Солнечной системы, обнаружили там оживенные и замороженные газы в таких количествах, которые и не снились земным криогеникам. То, что удалось получить в земных лабораториях с колоссальным трудом, лежит, плавает и летает там с незапамятных времен.

Спутник Сатурна – Титан. На его поверхности очень холодно: в нижних слоях атмосферы температура составляет от 70 до 75 К. Поверхность покрыта "болотами" и "морями" из жидкого азота с примесью углеводородов; над ними стоит азотный туман.

В атмосфере планеты Нептун, состоящей из смеси водорода, гелия и метана, плавают облака из метанового "снега", а под ними "почва" из водяного льда с "озерами" из жидкого метана. Его спутник – Тритон частично покрыт, как и Титан, "океаном" из смеси жидких азота и метана, а на "суше" громоздятся горные хребты из замороженного метана.

Плутон – самая отдаленная от Солнца планета – так же, как и его спутник Харон, почти полностью состоит из замороженного метана. Этот газ, который содержится в недрах Земли и используется как ценнейшее топливо, там служит основным "строительным" материалом гео- и атмосферы этих планет.

Есть в Солнечной системе не только "крио", но и "холодильные" планеты и спутники. Например, Европа – спутник (вернее – спутница) Юпитера, не так холодна, как эти планеты.

Она вся покрыта самым обычным водяным льдом. Но толщина этой ледяной корки фантастическая – около 100 км! По сравнению с ней даже самые толстые ледники Антарктиды и Гренландии – тонкие пленочки!

При этом нужно вспомнить и о том, как удалось узнать обо всем этом. Космическая техника, которая вывела американские станции и другие объекты на орбиты, без криогеники не смогла бы ни запустить ракеты-носители, ни управлять космическими лабораториями, ни поддерживать с ними связь на расстояниях, которые радиоволны, несущиеся со скоростью света, преодолевают только за 3–4 ч!

Первым "сватом", который свел космическую технику с криогеникой, был ее основоположник К. Э. Циолковский. В 1903 г. он предложил реактивный двигатель для космической ракеты, в котором топливом служил бы жидкий водород, а окислителем – жидкий кислород. На рис. 8.11 дана схема такой ракеты, взятая из работы Циолковского. На рисунке показаны даже насосы, предназначенные для подачи жидких кислорода и водорода в камеру сгорания. Чтобы почувствовать, насколько далеко вперед смотрел Циолковский, нужно вспомнить, что в это время даже жидкий кислород был экзотическим продуктом, о котором можно было только прочесть заметку в журнале. Его количество во всем мире измерялось литрами, а Циолковский писал о баках ракеты, в которые нужно было налить тонны жидкого кислорода! Он также деловито рассуждал не только о жидкокислородных и жидководородных баках на борту ракеты, но и о насосах и камере сгорания!

Что касается водорода, то тогда ученый мир еще не пришел в себя от восторга после первого оживления водорода Д. Дьюаром. Общий запас его во всем мире мог поместиться в одном небольшом сосуде. Реализовать полностью все эти идеи Циолковского смогли только через 60 лет.

Но характерно, что при совершенно несоизмеримой разнице между простой картинкой Циолковского и сложнейшей конструкцией современной жидководородной ступени ракеты-носителя принципиальная ее схема точно та же.

Путь к ней был, естественно, не таким простым; от "сватовства" до "свадьбы" было очень далеко. К. Э. Циолковский это понимал очень хорошо. "...Я нисколько не обманываюсь и отлично знаю, что не только не решаю вопроса во всей полноте, но что остается поработать над ним в 1000 раз больше, чем я

ки через изоляцию баков приводят не к испарению жидкости, а только к плавлению части льда; жидкость в баках может храниться дольше.

Не допуская преувеличения, можно утверждать, что связь космической техники с криогеникой, начатая Циолковским, помогла человеку не только выйти в космос, но и развить, как часто бывает, другие возможности. Одно из них – использование жидкого метана, а затем и жидкого водорода в качестве топлива в авиационных и автомобильных двигателях. Опытный самолет ТУ-154 уже летал на жидком водороде. Но это только первые шаги. Для новых межконтинентальных сверхзвуковых лайнеров это топливо дает еще больше возможностей. По самым скромным подсчетам, масса самолета во время полета при переходе на жидкий водород снизится при прочих равных условиях примерно на 25%, а стоимость – примерно на 30%. Кроме этого, продукт сгорания (а не продукты, как у керосина) будет экологически чистым.

Вернемся, однако, к теме "Космос и низкие температуры". Она связана не только с холодом космического пространства и плавающими в нем замороженными планетами и спутниками. Ведь в космосе царит и вакуум – "родной брат" низких температур. Вспомним первые шаги искусственного охлаждения, описанные в гл. 2. Одним из самых первых было вакуумирование откачкой пара – сначала над водой, а затем и над другими жидкостями, температура которых понижалась при этом вплоть до точки замерзания. При дальнейшей откачке за счет сублимации льда можно было добраться и до более низких температур. Но в космосе, если мы хотим применить такой способ получения низкой температуры, не нужно никакой искусственной откачки, никаких вакуум-насосов! Достаточно открыть пробку сосуда с жидкостью и сам космос высосет из него пар до любого нужного низкого давления. При этом нужно прилагать усилия не для того, чтобы отсосать пар; напротив, вся трудность сводится к тому, чтобы не выпустить слишком много паров, и удержать давление над жидкостью (или льдом) на нужном уровне. Поскольку давление и температура (см. рис. 2.7) для каждого испаряющегося вещества однозначно связаны между собой, можно таким способом получить любую нужную температуру.

На таком принципе устроены многочисленные космические расходные криорефрижераторы. В сосуде Дьюара помещается объект криостатирования, окруженный жидкостью (гелием, метаном, аргоном и др.) или льдом (твердым водородом, неоном, метаном и др.). Когда сосуд (криостат) выведен в космос, пробка отстреливается, и пар из сосуда отсасывается космическим вакуумом; давление в криостате (а следовательно, нужная низкая температура) поддерживается автоматическим вентилем. На рис. 8.12 показан разрез одного такого криостата с замороженным криоагентом. В зависимости от запаса криоагента и тепловой нагрузки он может работать как несколько суток, так и несколько месяцев и даже лет.

Если криоагент в таком рефрижераторе не твердое тело, а жидкость (например, жидкий гелий, который необходим, если нужна температура в несколько кельвинов или даже ниже), то задача усложняется. Ведь в условиях невесомости жидкость не будет находиться в нижней части сосуда (там вообще нет ни "верха", ни "низа") и может вместе с паром вылететь из криостата. Но эта трудность была преодолена созданием специальных хитрых сепараторов, которые пропускают пар, но задерживают жидкость.

Если с помощью космического вакуума можно получать холод, то естественно возникает мысль: нельзя ли, наоборот, с помощью холода получать космический вакуум? Такие идеи – "перевертыши" часто используются в технике.

Когда понадобился космический вакуум на земле (для физических исследований, при испытаниях космических изделий и др.), были созданы основанные на криогенной технике вакуумные насосы. Таким криовакуумным насосам не поручается столь "грубая работа", как откачка основной массы газа; для этого используются обычные вакуумные насосы. Только после того, как они сделают свое дело, включается криовакуумный насос и начинается "охота" за оставшимися молекулами (а их довольно много – миллионы на 1 см^3). Всех их выловить, конечно, невозможно, однако вакуум, близкий к космическому, получается. Как же это делается?

Вакуумные насосы, предназначенные для получения такого вакуума, бывают двух типов – криоконденсационные и криосорбционные. Действие первых – криоконденсационных, основано на том, что на внутренней оребренной поверхности насоса, охлажденной до низких температур, вымораживаются,

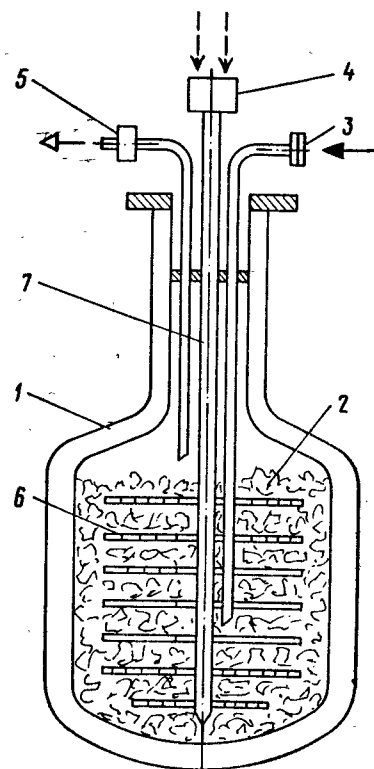


Рис. 8.12. Схема и разрез космического криостата с замороженным криоагентом:

1 — металлический сосуд Дьюара; 2 — замороженный криоагент; 3 — трубка для заливки криоагента; 4 — охлаждаемый объект (приемник излучения); 5 — трубка для отвода пара в космическое пространство; 6 — металлические перфорированные диски для отвода тепла от стержня; 7 — стержень для отвода тепла от объекта

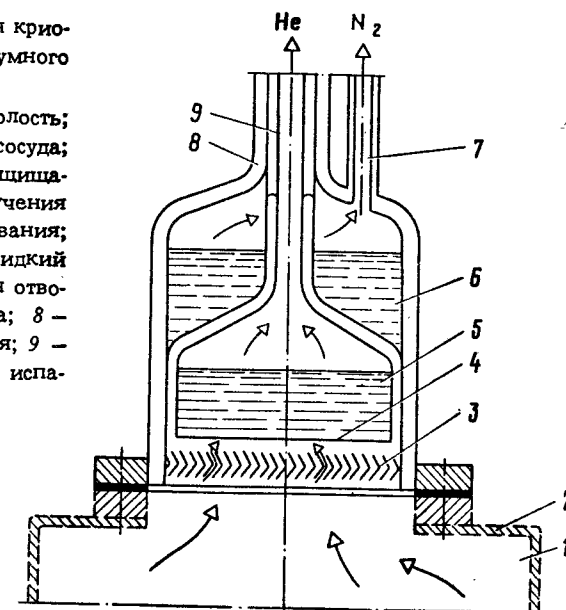
оседают и накапливаются в виде мелких кристалликов частицы газа. С ними происходит примерно то же, что с мухами, садящимися на липкую бумагу. Процесс криозахвата идет до тех пор, пока вакуум в отсасываемой полости не достигает нужного уровня. На рис. 8.13 показан один из вариантов такого насоса.

Криоадсорбционные насосы действуют подобным же образом, но в них молекулы газа не вымораживаются на охлажденных панелях, а поглощаются адсорбентом¹, охлажденным до низких температур.

¹ Адсорбент — вещество с большим числом мелких незамкнутых пор, на поверхности которых высаживаются атомы или молекулы поглощаемого вещества (например, активированный уголь, силикагель и др.). Площадь поверхности пор очень велика; на 1 кг адсорбента она составляет до 1000 м².

Рис. 8.13. Схема действия криоконденсационного вакуумного насоса:

1 — вакуумируемая полость; 2 — корпус вакуумного сосуда; 3 — шевронный экран, защищающий от теплового излучения поверхность вымораживания; 5 — жидкий гелий; 6 — жидкий азот; 7 — трубопровод для отвода испарившегося азота; 8 — вакуумная теплоизоляция; 9 — трубопровод для отвода испарившегося гелия



Так, с помощью криогеники создаются космические условия на земле; чтобы полностью их имитировать, в вакуумной камере обеспечивают и соответствующую криотемпературу.

Глава девятая

ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Прогнозирование — рискованное занятие для любого человека, взявшего на себя роль пророка.

Р. Эйрес

Вот и закончилось наше путешествие по стране низких температур. Началось оно от 0°C и закончилось около 0 K. В течение всего этого пути — от твердой воды до жидкого гелия, пути, растянувшегося с глубокой древности до наших дней, было много встреч с интересными событиями, выдающимися деятелями науки и техники, их творениями, победами и поражениями...

Во многих местах хотелось бы остановиться, побыть подольше и увидеть побольше. Однако объем книги ограничен; о многом пришлось писать коротко, а некоторые интересные вопросы просто опустить. Лишний раз подтверждается мудрое изречение Козьмы Прутка: "Нельзя объять необъятное".

Остается подвести некоторые итоги и посмотреть вперед – что же дальше?

Что касается подведения итогов, то лучше всего, по-видимому, представить весь путь от "ледяного" нуля до "гелиевого" в таком виде, чтобы его можно было окинуть одним взглядом. Тогда отдельные события не будут заслонять общего хода дела. Это можно сделать в форме графика, на котором показаны в сжатом виде достижения в области низких температур в их логической связи. Два таких графика показаны на рис. 9.1 и 9.2.

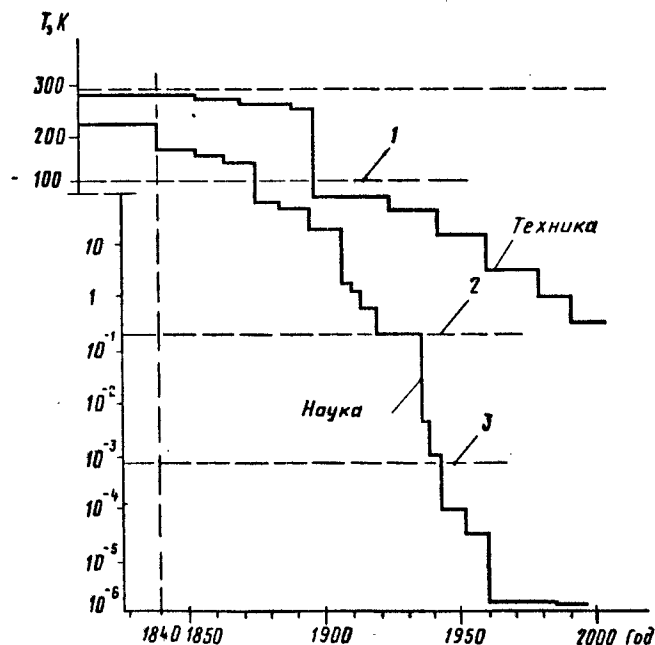


Рис. 9.1. Динамика развития науки в связи с развитием низкотемпературной техники:

1 – условная граница холодильной и криогенной отраслей техники (при 120 K); 2–3 – границы температур, достигаемых откачкой пара криоагента и адиабатным размагничиванием атомов (ниже – ядерное размагничивание)

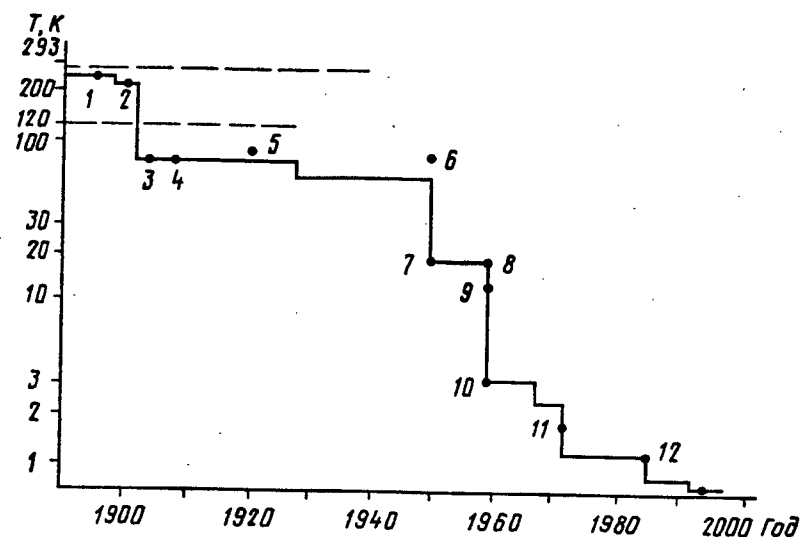


Рис. 9.2. Динамика развития криогенной техники:

1 – холодильные установки; 2 – низкотемпературные холодильные установки; 3, 4 – получение жидких кислорода и азота; 5 – извлечение гелия из природного газа; 6 – транспортировка сжиженного природного газа; 7 – разделение смеси водород–дейтерий ректификацией; 8 – жидкий водород для ракетной техники; 9 – водородная "шуга"; 10 – транспортировка жидкого гелия и криостатирование сверхпроводящих устройств; 11 – криовакуумные насосы; 12 – имитация Космоса и криостатирование космических объектов

Рисунок 9.1 показывает динамику развития как низкотемпературной науки, так и техники в их взаимосвязи. Нижняя линия представляет наинизшие температуры, достигнутые к соответствующим годам, верхняя – температуры, используемые в технике и технологии. Ось температур сделана в логарифмической шкале, сжатой сверху и растянутой снизу с тем, чтобы удобнее показать ход событий в области температур ниже 1 K.

Построение графика начинается с 1840 г. Именно в это время опыты Фарадея дали решающий толчок низкотемпературным исследованиям. Отсутствие на графике некоторых событий XVII – начала XIX вв. не означает, естественно, неуважения к трудам и заслугам исследователей, работавших в эти времена над проблемами холода. Их достижения, которые легли в основу всех последующих открытий и изобретений, не могут

игнорироваться. Но в масштабах графика температуры, близкие к окружающей среде, просто не будут видны. Тем более на графике не отражены события периода, относящегося к предыстории низких температур. По выражению Р.Тевено, длительное время занимавшего пост президента Международного института холода, это время можно разделить, по аналогии с общей историей человечества, на две части: "палеолит" (древний каменный век) и "неолит" (новый каменный век). Эта аналогия очень удачна.

В "палеолите" человек довольствовался тем, что "подбирал" природный холод в том виде, который ему давали боги. В "неолите" человек уже обрабатывал этот природный холод, приспособлявая его к своим нуждам. Переход от пассивного собирательства к активному воздействию на объект труда, который произошел во время "неолитической революции", знаменует резкое, качественное изменение с далеко идущими последствиями. Итак, график наглядно показывает эти последствия: за 100 лет (с 1850 по 1950 г.) был фактически пройден весь путь "от нуля до нуля". Дальше, собственно, двигаться уже некуда (хотя нуль оси ординат уходит вниз до бесконечности, поскольку наука утверждает, что он в принципе недостижим).

Несколько иная картина с криогенной техникой; понижение температур, определяющих ее применение (исключая приборы для физических исследований), идет менее круто. Это происходит потому, что разработка и освоение криотехнических систем неизбежно требуют времени. Кроме этого, на уровне температур ниже 1 К заказчиков на криогенику, не считая физиков, связанных с научными исследованиями, пока нет.

На графике рис. 9.2 линия, относящаяся к технике, показана более подробно, начиная с 1890 г. Здесь отмечены моменты, соответствующие появлению основных технических достижений, связанных с криогенной техникой.

Эти графики наглядно показывают, что дальнейшее развитие низкотемпературной техники в части получения все более низких температур уже не имеет смысла. Значит ли это, что подавляющее большинство исследователей, как холодильщиков, так и криогеников, должны менять профессию и искать другие сферы приложения своих творческих возможностей? Тогда они должны только выпускать уже известные машины, аппараты и устройства (естественно, хорошего качества) и довольствоваться этим.

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно посмотреть на ситуацию шире: во всех ли характеристиках холодильная и криогенная отрасли техники достигли практически предела, так же как с получением низких температур? Отвечая на такой вопрос, чаще всего думают о возможностях увеличения, говоря языком системного подхода, "выхода" (производительности). Действительно, здесь есть определенные возможности; можно делать более крупные и производительные установки. Можно делать и разные их варианты, приспособленные к задачам, которые ставит тот или другой заказчик. Это тоже нужно. Но такие пути нового не сулят – это в значительной степени повторение пройденного.

Чтобы выйти из кажущегося творческого тупика, нужно обратить внимание на другой, более информативный показатель – отношение "выхода" установки ко "входу", т.е. результат к затратам. Если ограничиться энергетическими показателями, то при корректном подсчете эта величина соответствует КПД. Каков он у современных криогенных установок, показано ниже:

	КПД, %
Воздухоразделительная установка	15–20
Ожижитель:	
азота	30–35
водорода	10–15
гелия	8–12
Микрокриорефрижератор на уровень температур, К:	
80	20–25
20	10–12
4	5–8

Эти значения, близкие большей частью к КПД паровоза, заставляют задуматься; получается, что 70–80% (а то и более) затраченной электроэнергии уходит в потери.

Таким образом, становится очевидным, что дальнейший путь развития техники низких температур и соответственно ее научной базы должен идти в основном по пути повышения ее энергетического совершенства. Этот термин – "энергетическое совершенство" нужно понимать в более широком плане, чем просто сокращение расхода энергии на эксплуатацию (и соответственно повышение КПД). Чтобы создать установку, нужны материалы, оборудование, человеческий труд и энер-

гия. В свою очередь, добыча материалов, изготовление оборудования, обеспечение инфраструктуры (жилья, питания и др.) также требуют энергии. В конечном счете, все неизбежно сводится к ней. Если есть работоспособная энергия – абсолютный ресурс – можно добыть и сделать все что угодно. Нет энергии – ничего сделать нельзя даже тогда, когда материальные ресурсы в изобилии.

В настоящее время при росте населения, которое сопровождается истощением многих природных ресурсов и загрязнением окружающей среды, задача совершенствования любой техники – это максимальная экономия всех ресурсов, а в конечном счете – энергии. Холодильная техника в сочетании с криогеникой занимает при этом важное место. Они вместе забирают в развитых странах до 15–20% электроэнергии, не говоря уже о других ресурсах. Это достаточно большое значение.

Каковы же возможные пути совершенствования этих отраслей на ближайшую перспективу? Делать прогнозы в наше время очень трудно, особенно если речь идет о сроках, превышающих 5–10 лет. Примеров неудачных, иногда даже анекдотических научно-технических прогнозов, которые делали иногда очень умные люди, известно много.

Проще всего было бы отказаться от этого. Книга уже написана, а будущее само покажет, куда пойдет дело. Однако отступать здесь нельзя. Нужно соблюсти только одно условие – быть больше оптимистом, чем пессимистом, поскольку прогнозы первых сбываются чаще (разумеется, это относится не к политике).

Итак, что можно сказать о ближайших перспективах развития низкотемпературной техники и технологии? Если оставить в стороне конструктивные улучшения техники¹, которые будут происходить постоянно, но дают сравнительно небольшой эффект, а обратиться к фундаментальным, то нужно назвать четыре.

1. Использование текучих рабочих тел с новыми полезными теплофизическими свойствами, в том числе смесей жидкостей в метастабильном состоянии² и двухфазном (типа "шуги").

¹ Напомним, что термин "техника" охватывает все то, посредством чего достигается нужный результат; термин "технология" – все способы, которыми он достигается. Первый связан с вопросом "чем?", второй – "как?"

² Имеются в виду переохлажденные жидкости, т.е. охлажденные ниже температур затвердевания, но остающиеся жидкими (см. гл. 7).

2. Применение новых способов сжатия, расширения и транспортировки рабочих тел в электрическом и магнитном полях.

3. Использование вторичных и других низкотемпературных энергетических ресурсов для привода (основного или вспомогательного) оборудования низкотемпературных систем.

4. Использование электрокалорического и магнитокалорического (ЭК и МК) эффектов на основе поиска новых диэлектриков и магнетиков, а также высокотемпературной сверхпроводимости.

Прогнозировать новые приложения низкотемпературной техники в разных технологиях – это еще более трудная задача; их число очень велико.

Единственное, что следует при этом отметить – это тенденция ко все большему выходу криотехнологий за пределы области их известных применений: пищевой, медицинской, биологической, а также радиоэлектронной. Здесь можно выделить два новых направления – криохимию и криоэнергетику.

Криохимия возникла в связи с открытием своеобразных химических реакций, активно протекающих при низких температурах. Это открывает большие возможности создания новых веществ и материалов.

Интерес к криоэнергетике возник в связи с неизбежным в перспективе освоением полярных областей на Земле и необходимостью освоения ближнего космоса, в частности поверхности Луны. Использование низких температур окружающей среды в этих условиях дает возможность создания достаточно эффективной и, главное, экологически чистой энергетики.

Необходимо в заключение уделить внимание несколько неожиданному, но очень важному направлению низкотемпературной техники – использованию ее не для охлаждения, а для нагревания различных объектов при температурах 80–1500 К и выше. Этот, на первый взгляд противоречащий нормальной логике перенос: техника, специально созданная для производства холода, используется для диаметрально противоположной ее назначению цели, да еще в несвойственной ей температурной области.

Возникает, естественно, два классических вопроса: каким образом это стало возможно и зачем это нужно?

Ответ на первый вопрос будет дан ниже; предварительно можно лишь отметить, что поскольку перенос технических

идей из "горячей" области в "холодную" осуществляется успешно¹, то обратный процесс тоже не исключается.

Однако, кроме возможности, надо принимать во внимание и целесообразность. Ведь гораздо проще производить нагрев старым, известным тысячи лет классическим способом – непосредственным сжиганием топлива! Однако оказывается, что этот простой путь далеко не всегда хорош как с экономической, так и с экологической точек зрения.

Известно, что современная энергетика в основном базируется, несмотря на появление атомных электростанций, на сжигании ископаемого органического топлива (угля, нефти и газа). Настоятельная необходимость его экономии очевидна. Дело не только в истощении запасов и возрастающей стоимости добычи. Не меньшее значение имеет и настоятельная необходимость замедлить, а затем и радикально снизить негативное воздействие энергетики на окружающую среду.

Работу в этом направлении можно вести как с "головы" энергетики (производство энергии из природных источников), так и со стороны "хвоста" (использование произведенной энергии). Когда говорят об энергетике, обычно основное внимание обращают на "голову" – производство электроэнергии. Находящиеся на "хвосте" потребители пользуются гораздо меньшим вниманием. Между тем, каждый 1 кВт·ч электроэнергии, используемый в конце энергетической цепи, стоит намного больше, чем в ее "голове". Действительно, если, например, КПД² электростанции составляет 35 %, системы электропередачи – 96 %, а холодильника – 15 %, то общий КПД всей цепочки преобразования энергии $\eta = 0,35 \cdot 0,96 \cdot 0,15 = 0,05$, или 5 %. Это означает, что 1 кВт·ч электроэнергии, сэкономленный в холодильнике, даст экономию энергии в "голове", равную $1/0,05 =$

¹ Вспомним, например, турбодетандер Капицы, родившейся от "теплых" паровой и водяной турбин (см. с. 277–279), или столь же "холодный" регенератор Френкля (с. 274), происходящий от горячих регенераторов металлургических печей. Да и сама парокompрессионная холодильная установка – это, по существу, паровая машина, пущенная "наоборот".

² Напомним, что КПД – коэффициент полезного действия любого устройства преобразования энергии – это отношение действительного энергетического эффекта его работы к тому, который был бы получен, если бы оно было идеальным. Для тепловых и холодильных установок идеальным образцом служит цикл Карно (см. "первый научный комментарий", с. 47).

$= 20$ кВт·ч! В денежном выражении разница будет еще больше, так как эксплуатационные затраты делаются не только вначале (на топливо), но и на всех этапах преобразования энергии.

Таким образом, как с точки зрения экономии ресурсов, так и уменьшения вредных воздействий на окружающую среду, нельзя недооценивать важность усовершенствования технических объектов, замыкающих цепочку энергетических превращений. О КПД расположенных именно здесь холодильных и криогенных установок мы уже говорили. Каков этот коэффициент у отопительных устройств?

Чтобы его вычислить, нужно сравнить действительный, реальный процесс нагрева с идеальным для тех же условий.

Используем для этого формулу С. Карно, переместив цикл из нижней температурной области (под $T_{о.с.}$) в верхнюю (над $T_{о.с.}$). Тогда нижняя температура $T_o < T_{о.с.}$ должна быть заменена на $T_{о.с.}$, а верхняя "теплая", соответствующая условиям нагрева, – на $T > T_{о.с.}$. В этом случае значение $L = \frac{T - T_{о.с.}}{T} Q = \tau Q$ покажет ра-

боту, которую можно получить в идеальном процессе, используя теплоту Q при температуре $T > T_{о.с.}$

Таким образом, значение работы L становится мерой качества, работоспособности теплоты Q . Из формулы видно, что чем выше T , тем она больше при данной температуре среды $T_{о.с.}$. Если температура очень высока, то работоспособность, измеряемая значением L , становится близкой (а в пределе и равной)

Q , поскольку значение $\tau = \frac{T - T_{о.с.}}{T} = 1 - \frac{T_{о.с.}}{T}$ стремится к еди-

нице. Если же температура T будет снижаться, то ценность теплоты, измеряемой ее работоспособностью, падает и при $T = T_{о.с.} = 293$ К становится равной нулю, что видно из данных, приведенных ниже:

T, K	3000	2000	1000	800	500	400	300	293
L/Q	0,90	0,85	0,71	0,63	0,41	0,27	0,02	0,0

Напротив, при высоких температурах энергетическая ценность теплоты очень высока и она почти целиком может быть превращена в работу.

Зная значение работоспособности (в термодинамике для нее используется термин "эксергия" [18]) теплоты Q , можно оп-

ределить эффективность различных способов нагрева при разных температурах. Если речь идет, например, о металлургических процессах, где нужны температуры 1200–1500°C (1473–1773 K), то очевидно, что прямое использование теплоты, получаемой непосредственно при сжигании топлива (в идеале здесь $\tau \rightarrow 1$) выгодно, поскольку τ горячего металла составляет 0,8–0,84. Однако для отопления и других процессов, где нужны температуры 80–150°C (353–423 K), ситуация выглядит иначе. Соответствующее значение τ находится в пределах от 0,31 до 0,17. Это означает, что большая часть (60–80 %) работоспособности теплоты, которую можно было бы использовать для производства работы или электроэнергии, теряется бесполезно при ее переходе с верхнего уровня на нижний. Соответственно КПД таких процессов, когда, например, вода или воздух помещения нагреваются прямым сжиганием топлива или электроэнергией (у которой $\tau = 1$) очень низок и не превышает 20 %. При современной энергетической и экологической ситуации такая варварская трата работоспособности топлива в крупном масштабе недопустима.

Еще в прошлом веке некоторые выдающиеся научные деятели обратили внимание на это обстоятельство. Были намечены два пути решения задачи, но начало их реализации было положено только в 20-х годах нашего века.

Первый из них – **теплофикация** – основан на том, что турбины электростанций расширяют пар не до давления, соответствующего температуре окружающей среды $T_{o.c}$, как это делается на конденсационных электростанциях, а до некоторого промежуточного давления. При этом еще достаточно горячий пар может использоваться для отопления или других нужд либо непосредственно, либо нагревая воду. В результате такие станции (теплоэлектроцентрали) используют верхнюю часть перепада температур, которая бы терялась при непосредственном нагреве для получения работы, превращаемой в электроэнергию, а нижнюю его часть – для нагрева при промежуточной температуре T_H . Отдаваемая при этом работа несколько уменьшается, но зато нагрев осуществляется экономично – использованием отработанной низкотемпературной теплоты. Таким образом, весь интервал температур разбивается на две части – верхнюю от T до T_H , которая используется для работы, и нижнюю – от T_H до $T_{o.c}$ – для получения теплоты. Потеря работоспособности в интервале от T до T_H , связанная с непосред-

ственным нагревом потребителя, исключается, и **расход топлива** на цели обогрева снижается более чем вдвое.

Такой широко распространенный в нашей стране путь решения задачи отопления и нагрева – **теплофикация** – имеет и некоторые недостатки. Первый из них состоит в том, что производство теплоты тесно связано с выработкой электроэнергии, а соотношения в их потреблении существенно меняются как по сезонам, так и в течение суток. Второй связан с транспортированием горячей воды на большие расстояния по теплоизолированным трубам, что приводит к относительно большим затратам на их прокладку, ремонт и обслуживание.

Второй способ экономичного нагрева осуществляется не "сверху вниз" (от T до T_H), как на ТЭЦ, а наоборот, "снизу вверх" (от $T_{o.c}$ до T_H) на базе принципов холодильной техники. В. Томсон-Кельвин взглянул на парокомпрессионную холодильную установку в несколько неожиданном для своих современников (и не только для них) аспекте. Ведь ее назначение – забирать теплоту на низком уровне T_0 и отдавать на более высоком $T_{o.c}$ >> T_0 . Что, если ее "передвинуть" вверх по температурам?

Тогда нижним уровнем станет $T_{o.c}$, а верхним – $T_H > T_{o.c}$. В этом случае холодильная установка будет непрерывно "качать" бесплатную теплоту из окружающей среды (воды, воздуха или грунта) на уровень T_H , нужный для отопления и других целей, связанных с нагревом. Получится некий "тепловой насос". Энергия будет затрачиваться только на "перекачку" теплоты снизу вверх.

Выгодно ли это? Взглянем на рис. 2.9 и представим с его помощью процесс работы теплового насоса. Отличие от холодильной установки будет состоять только в том, что температуры сдвинутся вверх: T_0 будет заменена на $T_{o.c}$, а $T_{o.c}$ на T_H . Тогда отрезок ab будет соответствовать теплоте $Q_{o.c}$, отбираемой из окружающей среды при $T_{o.c}$, а отрезок cd теплоте Q_H , отдаваемой потребителю на уровне T_H ; работа, нужная для этого, будет равна L (отрезок md). Очевидно, что произведенная теплота $Q_H = L + Q_{o.c}$ будет больше как даровой теплоты, отобранной из окружающей среды, так и затраченной работы L . Отношение $\mu = \frac{Q_H}{L} = \frac{L + Q_{o.c}}{L}$ называется *коэффициентом преобразования*

теплового насоса; он всегда больше единицы. Если, например, $T = 293$ K (20°C), а $T_H = 353$ K (80°C), то $Q_H / Q_{o.c} = T_H / T_{o.c} = 353 / 293 = 1,2$. Следовательно, единица бесплатной теплоты из окружа-

ющей среды дала 1,2 единицы отопительной теплоты посредством затраты только 0,2 единиц работы! Коэффициент преобразования здесь составит $\mu = 1,2/0,2 = 6$.

Это значение относится, разумеется, к идеальному случаю (цикл Карно). В реальных условиях при КПД теплового насоса $\eta = 0,35 \div 0,4$ $\mu = 2,1 \div 2,4$.

Но и при таких показателях тепловой насос остается энергетически выгодным. Ведь получение такого же результата прямым электрическим или огневым нагревом потребовало бы затраты в 2,1–2,4 раза больше. В реальных условиях, когда часть теплоты теряется, эта разница еще возрастает. Выгода очевидна!

Тепловые насосы постоянно совершенствуются и находят все большее применение для отопления отдельных зданий, микрорайонов, ферм и т.д. Они дают наряду с теплофикацией большую экономию топлива.

Особенно эффективны они тогда, когда в качестве источника теплоты используются сточные воды, более теплые, чем окружающая среда. Тогда μ будет еще выше. Так, холодильная техника показала свои возможности в новой, "теплой" области, где, казалось бы, ее применение не имеет смысла.

Как это часто бывает при увеличении техническими новинками, находятся изобретатели – энтузиасты, идеи которых переходят границы реально возможного. Так произошло и с тепловыми насосами. Восхищенные тем фактом, что μ теплового насоса выше единицы (т.е. превышает 100 %) они решили, что это прообраз вечного двигателя, работающего "за счет неограниченного количества теплоты окружающей среды" и имеющего КПД больше 100 % [7, 18]. Это, разумеется, ошибка, основанная на непонимании того простого факта, что μ – это совсем не КПД, который, как мы видели, не превышает 40 %. Но, если бы даже он был 100 %, из теплоты, даваемой тепловым насосом, можно было бы получить лишь ровно столько же работы, сколько было затрачено на его привод. Однако, если даже отбросить эти "ненаучно-фантастические" идеи, тепловой насос – тепловое детище холодильной техники – входит в современную энергетику как ее существенно важный элемент.

Обо всем, что описано в этой книге, можно было бы рассказать еще много интересного и поучительного. К сожалению, она всего этого вместить не может. Что касается перспектив, то время покажет, как и какие направления низкотемпературной техники будут развиваться на пользу людям в оставшиеся годы XX в. и в дальнейшем.

УКАЗАТЕЛЬ ИМЕН

Абрикосов А. 266
Агрикола Т. 213
Александр Македонский 12
Аллен Л. 86, 89
Амонтон Г. 28, 29, 31, 33
Андроникашвили Э. 234, 262–263
Аристотель 25
Афанасьева-Эренфест Т.А. 245

Бардин И. 286
Беднорц Д. 269
Беляев А. 219, 292
Бернулли Д. 28
Бертолле К. 242
Блок А. 165
Блэк Д. 26, 27, 29, 33, 34, 47
Боголюбов Н. 266
Болдуин С. 250
Бойль Р. 35, 62
Борн Н. 262
Борн М. 245
Браун И. 31
Браун фон В. 273
Бунзен Р. 110, 139
Бушера П. 226, 227
Бэкон Ф. 9, 18, 19, 25, 53, 212

Ван-дер-Ваальс И. 139, 141
Ван-Марум М. 33, 139
Вант-Гофф Я. 139
Верн Ж. 172
Виллафранка Б. 18
Виндхаузен Ф. 86, 89, 182, 183, 187
Вольф Х. 27
Вроблевский З. 74, 105–108, 111–113
115–117, 133–134

Гадолин Ю. 236
Галилей Г. 21, 25, 26, 28
Гаррисон Д. 93, 94, 101, 199

Гейландт П. 171
Гей-Люссак Д. 59, 77, 94
Гелиогабал 13, 212
Гельмгольц Г. 108, 109
Гепперт Г. 201, 203
Герике Отто фон 22, 35
Гершель Д. 77
Гесс А. 166
Гинзбург В. 265, 266, 269
Гиппократ 13, 306
Гиффорд П. 87
Глизманенко Д. 286
Глушко В. 273
Годдард Г. 273, 312
Головкин Н. 197
Горри Д. 77–80, 89, 124, 165, 213
Горьков Л. 266
Грассман П. 282
Гродзинский В. 115
Гук Р. 23
Гюйгенс Х. 23, 139
Гюллен В. 76, 114, 208

Дальтон Д. 26, 30, 77
Дарвин Ч. 58, 77
Дарвин Э. 58, 77
Д Арсонваль Ж. 130, 134, 159, 166, 226, 227, 283, 291
Даунт Д. 255
Дебай П. 234–237
Делиль Ж. 24
Демокрит 26
ДеХаас В. 234, 244, 245, 248
Джиок У. 234–238
Джоуль Д. 60, 61, 125
Дирак П. 245
Дюар Д. 117–119, 127, 130–137, 140–142
Дюма М. 64
Дэви Г. 36, 35

Жи́рар П. 64
Жолио-Кюри Ф. 104

Ибн-Ал-Усо́бия 18
Ишкин И. 286
Ио́ффе А. 242, 244–245

Кавалло Т. 90
Кавендиш Г. 117, 131, 173, 174, 249
Каганович Л. 272
Кайете Л. 64–67, 73–74, 109–113, 121, 158, 214, 235
Каммерлинг-Оннес Г. 121, 135–144, 230–234, 253, 255, 264, 266, 267
Каньяр де-ла Тур 43
Капица П. 234, 241, 244–245, 248–252, 257–260, 271–284, 286–289, 307
Карно Л. 242
Карно С. 48–50, 57, 77, 100, 237
Карре Ф. 94, 98, 178, 179, 181, 183, 213, 187
Карре Э. 181
Кеезом В. 225, 234, 245, 254, 255
Кирк А. 77, 83–86, 89, 104
Кирхгоф Г. 108, 110, 139
Клаузиус Р. 48–50, 57, 100, 108
Клод Ж. 158, 159, 164–168, 174, 176–177, 178, 226–227, 271, 272, 277, 279, 283, 298, 302
Клузиус Р. 254
Клуэ Л. 33
Коновалов Д. 148
Кома́ров Н. 215
Коперник Н. 106
Королев С. 273
Костюшко Т. 107
Кохан В. 269, 270
Коцебу О. 221
Крафт Г. 30
Кроуфорд А. 27, 30
Кунцлер Д. 266
Купер Л. 266
Кэрриер В. 213
Кюри М. 141

Лавуазье А. 242, 310
Лагранж Ж. 242
Лазарев В. 269–270

330

Ламберт И. 30, 31
Ландау Л. 109, 234, 241, 244–246, 248, 262–265
Лаглас П. 242
Лебедев П. 129
Леблан М. 188
Левенгук Д. 139
Ленин В. 242, 243, 247
Лесли Д. 180, 181
Лефевр Ж. 72
Линде К. 100–102, 115, 118–124, 126–129, 146, 152–157, 161–163, 167, 174–177, 183, 187, 205, 212, 272–275, 279, 298, 301, 302, 307
Линней К. 25
Локк Д. 28
Ломоносов М. 24, 26, 27, 241
Лондон Ф. 260, 262, 265
Лукреций Кар 26
Луначарский А. 242
Людвиг XIV 14

Максвелл Д. 109
Малков М. 286
Маре А. 90
Маркс К. 290
Матыгин С. 219, 220
Махди 13, 212
Марциал 13
Маяковский В. 89
Мейснер В. 234, 264, 265
Межлаук В. 151, 152
Менделеев Д. 42, 43, 61, 119, 148, 250
Мендельсон К. 132, 255
Монж Г. 33, 242
Мороз А. 286
Морозов И. 128, 129
Мунтерс К. 201
Мюллер А. 269

Нассири Хосров 13
Нейрн Г. 180
Нернст В. 234
Ньютон И. 27, 131

Оберт Г. 273, 312
Ольшевский К. 74, 105–106, 110–119
Орджоникидзе С. 246
Оффенбах Ж. 172

Пайерлс Р. 265
Папин Д. 34
Перкинс Я. 91–93, 183
Пешков В. 234
Пикте Р. 64, 69–73, 111, 113, 121, 158, 192, 214, 135
Пикте М. 16, 58, 59, 77
Планк М. 245
Платен фон Б. 201
Порта Б. 18, 153
Пуассон С. 59
Пушкин А. 270

Рамзай У. 117, 139, 173, 174
Резерфорд Э. 174, 249
Реомюр Р. 24, 26, 27
Рихман Г. 24, 26, 27
Ричард Львиное сердце 13
Рубинин П. 249
Руски А. 9
Рэлей Д. 117, 173
Рэнкин Д. 213
Саладин 13
Свартс Ф. 191
Свифт Д. 32
Сен-Клер Деви́ль 65, 67, 68, 109
Сенека 13
Сикорский И.И. 242
Сименс В. 81, 82, 101, 121, 124, 165, 167, 274
Симон Ф. 253
Скотт В. 13
Сноу Ч. 243, 245
Стирлинг Р. 82, 293–300
Супук Г. 199, 200

Танкредус Л. 18
Тамм И. 245
Твиннинг А. 93
Тевено Р. 312
Телье Х. 99, 101
Тилорье К. 37, 38, 40, 60, 112, 190
Тиндаль Д. 94
Тисса Л. 260, 261
Толль Э. 221

Томсон-Кельвин У. 48, 50, 55, 57, 60, 61, 87, 94, 125, 213
Треверс М. 138, 173
Тревитик Р. 78
Тукачевский М. 312
Тюдор Ф. 220

Умов Н. 128, 129, 241, 275

Фарадей М. 36–38, 40–42, 57, 58, 69, 73, 94, 120, 132, 182, 319
Фаренгейт Г. 23, 27
Фейнман Р. 262
Филон Александрийский 20
Франциск I 17
Френкель М. 274, 275, 297
Фурье Ж. 27

Хаузен Г. 282, 283, 289
Хрущев Н. 289
Хэвисайд О. 131
Хэмпсон В. 118, 124, 126, 130, 135–138, 167, 304

Цандер Ф. 273, 313
Цейсс К. 101
Цельсий А. 24
Циолковский К. 273, 311–314
Цыцзик В. 195

Шальников А. 265, 307
Шмидт О. 243
Шредингер Э. 245
Шриффер Д. 266
Штремер Е. 24

Эванс О. 90
Эйлер Л. 27, 28
Эйнштейн А. 243, 245, 302
Энгельс Ф. 290
Эндрюс Т. 42–44, 65, 113
Эренфест П. 245

Ювенал 13
Юдин С. 306
Ягайло В. 106

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мендельсон К. На пути к абсолютному нулю. М.: Атомиздат, 1971.
2. Крузе А.С. Мастера рукотворного холода. М.: Пищевая промышленность, 1980.
3. Бражников А.М., Каучешвили Э.И. Холод. Введение в специальность. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984.
4. Грачев А.Б., Калинин Н.В. Получение и использование низких температур. М.: Энергоиздат, 1981.
5. Фрадков А.В. Что такое криогеника. М.: Наука, 1991.
6. Бурмин Г.С. Штурм абсолютного нуля. М.: Детская литература, 1983.
7. Бродянский В.М. Вечный двигатель прежде и теперь. М.: Энергоатомиздат, 1989.
8. Карцев В.П. Магнит за три тысячелетия. М.: Энергоатомиздат, 1988.
9. Фен Дж. Машины, энергия, энтропия: Пер. с англ. / Под ред. Ю.Г. Рудого. М.: Мир, 1986.
10. Капица П.Л. Письма о науке. М.: Московский рабочий, 1989.
11. Капица П.П. О науке и власти. М.: Правда, 1990.
12. Двигатели Стирлинга: Сб. статей / Под ред. В.М. Бродянского. М.: Мир, 1975.
13. Поглавский В.А. Природный холод. Киев: Наукова думка, 1989.
14. Андроникашвили Э.Л. Воспоминания о жидком гелии. Тбилиси: Тапатлеба, 1980.
15. Беляев А.Р. Продавец воздуха. Собр. соч. М.: Молодая гвардия, 1976, т. 4.
16. Бродянский В.М. Сади Карно. М.: Наука, 1993.
17. Горелик Г.Е. Моя антисоветская деятельность // Природа. 1991. № 11. С. 95–104.
18. Бродянский В.М. Энергия: проблема качества // Наука и жизнь. 1982. № 3. С. 88–95.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	7
Глава первая. Предыстория освоения холода (с древнейших времен до конца XVIII в.)	12
1.1. "Естественное" охлаждение	12
1.2. Первые шаги "искусственного" охлаждения	15
1.3. Термометрия и тепло	20
1.4. "Наинизшая степень холода"	28
Глава вторая. Начало экспериментальной физики низких температур (первая половина XIX в.)	33
2.1. Ожижение "постоянных" газов	33
2.2. Критическая и тройная точки. Абсолютная шкала температур	42
2.3. Новые способы охлаждения	58
2.4. Первый прорыв в область криотемператур. "Туманное" ожижение кислорода и азота	64
Глава третья. Первые шаги холодильной техники (первая половина XIX в.)	75
3.1. Искусственный лед вытесняет природный	75
3.2. Газовые (воздушные) холодильные машины	77
3.3. Паровые (парокомпрессионные) холодильные машины	90
Глава четвертая. От низкотемпературной физики к криогенной технике (вторая половина XIX – начало XX в.)	104
4.1. Криогенная техника догоняет холодильную	104
4.2. Дросселирование показывает свои возможности в криогенике.	119
4.3. Последний "неподдающийся" газ наконец ожижен	137
Глава пятая. Криогеника не только охлаждает газы, но и разделяет их смеси	146
5.1. От искусства перегонки – к низкотемпературной ректификации ...	146
5.2. Энергетика низкотемпературной ректификации	161
5.3. Семейство "ленивых газов" выходит в свет	173
Глава шестая. Холодильная техника набирает силу и завоевывает мир	178
6.1. Холодильная техника совершенствуется	178
6.2. "Холодильная цепь" – от поля до дома	194
6.3. Что еще может сделать полезного холодильная техника	205
6.4. Природные холод и лед на службе человеку – дело не только прошлого, но и будущего	218

Глава седьмая. Кривфизика XX в.	230
7.1. Жидкий гелий. Сверхпроводимость и магнитное охлаждение	230
7.2. Становление и трудные пути советской криогеники.	241
7.3. Парадоксы жидкого гелия	252
7.4. Сверхпроводимость — разочарования, успехи и надежды	264
Глава восьмая. Криогенная техника XX в.	271
8.1. "Кислородные дела"	271
8.2. От "макро" к "микро" криогенной технике	292
8.3. Космос и низкие температуры.	309
Глава девятая. Итоги и перспективы	317
Указатель имен	329
Список литературы	332

Научно-популярное издание

Бродянский Виктор Михайлович

**ОТ ТВЕРДОЙ ВОДЫ ДО ЖИДКОГО ГЕЛИЯ
(история холода)**

Редактор *Н. Н. Сошникова*

Художник обложки *Ю. С. Шлепер*

Художественный редактор *Б. Н. Тумин*

Технический редактор *Н. М. Брудная*

Корректор *З.Б. Драноекая*

ИБ № 3305

ЛР № 010256 от 07.07.92.

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинал-макета 21.10.94.
Формат 60 x 88 1/16. Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,58. Усл. кр.-отт.
21,06. Уч.-изд. л. 20,92. Тираж 2500 экз. Заказ 1880. С023

Энергоатомиздат. 113114. Москва М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в Московской типографии № 9 Комитета Российской Федерации по печати
109033, Москва, Волочаевская ул., 40.