

ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Второе издание, переработанное
и дополненное

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для техникумов электронных приборов

МОСКВА
ЭНЕРГОИЗДАТ 1981

ББК 31.77

О-75

УДК 621.385(075.3)

Рецензенты: А. П. Руссавская, В. П. Тятюшина

Авторы: А. И. Пипко, В. Я. Плисковский, Б. И. Королев,
В. И. Кузнецов

Основы вакуумной техники: Учебник для техникумов/ А. И. Пипко, В. Я. Плисковский, Б. И. Королев, В. И. Кузнецов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 1981. — 432 с., ил.

В пер.: 1 р.

Излагаются сведения по кинетической теории газов, физике вакуума и процессам на поверхности твердых тел, соприкасающихся с газами. Приводятся методы расчета вакуумных систем, современные средства откачки, измерения общего и парциального давлений, методы обнаружения мест натекания. В отличие от первого издания 1975 г. во втором приводятся принципы построения вакуумных систем оборудования для нанесения тонких пленок и других установок полупроводникового производства.

Предназначена учащимся техникумов электронных приборов.

О $\frac{30407-359}{051(01)-81}$ — 189-81 (Э). 2307000000

ББК 31.77

6П5.7

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Настоящая книга является учебником по предмету «Основы вакуумной техники», который изучается в техникумах электронных приборов.

В книге описываются современные средства откачки, измерения полного и парциального давлений, методы измерения газовых потоков и обнаружения мест натекания. Достаточно подробно рассматриваются принципы построения вакуумных систем и методы их расчета.

Предварительно излагаются необходимые сведения по физике разреженных газов, кинетической теории и взаимодействию между твердыми телами и соприкасающимися с ними газами. Весь материал книги дается применительно к технике получения вакуума в производстве электровакуумных и полупроводниковых приборов.

Для более полного усвоения материала почти во всех разделах книги приводятся примеры расчетов и конкретные задачи с ответами.

Во втором издании были переработаны и дополнены новым материалом практически все разделы, а также устранены по возможности опечатки и неточности, замеченные в первом издании книги.

Все определения основных понятий и термины, приведенные в книге, даны в соответствии с ГОСТ 5197-70, а используемые величины — в Международной системе единиц СИ.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность научному редактору канд. техн. наук С. И. Гоникбергу за помощь при подготовке книги к изданию, а также инж. В. Б. Гордону за участие в подготовке иллюстрационного материала.

Авторы

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Вакуумная техника — это наука, которая изучает физико-химические процессы в разреженных газах, вопросы получения, сохранения и измерения вакуума (слово «вакуум» в переводе с латинского означает «пустота»).

История вакуумной техники начинается с I в. до н. э., когда появились первые упоминания о вакуумных насосах, способных создавать небольшие разрежения (шприц Герона, водяной насос Ктезибия). Однако работы по изучению свойств вакуума не проводились вплоть до XVII в., видимо, из-за запретов, накладываемых церковниками, утверждавшими, что «пустота может быть создана только всемогуществом божьим» (из решений Парижского Собора под председательством аббата Тампье, XIII в.). В 1211 г. в уставе первого в мире Парижского университета было записано, что вопросами пустоты должны заниматься богословы, но ни в коем случае не естественники. На это запрещение еще в XIV в. ссылался Иоанн Буридан (французский философ-схоласт, ректор Парижского университета) как на причину, не позволявшую ему, натурфилософу, заниматься изучением пустоты.

Только в XVII в. Галилео Галилей (1564—1642 гг.), не терпевший церковных догм, вычислил «силу боязни пустоты» из факта невозможности подъема воды всасывающим насосом на высоту более 10 м, какого бы диаметра труба ни была.

В 1643 г. Эванджелисто Торричелли (1608—1647 гг.), ученик Галилея, открыл, что атмосфера создает давление, равное давлению столба ртути высотой около 760 мм. Пространство над ртутью в барометрической трубке, которое по представлению Торричелли было «абсолютной пустотой», названо в честь ученого «торричеллиевой пустотой». Теперь мы знаем, что это пространство заполнено парами ртути, имеющими при температуре —293 К давление $1,6 \cdot 10^{-1}$ Па.

В 1650 г. немецкий физик Отто фон Герике (1602—

1686 гг.) изобрел первый механический воздушный насос и провел знаменитый опыт с магдебургскими полушариями, однако еще долгое время, вплоть до XIX в., вакуум практически применялся лишь в устройствах для откачки воды из колодцев.

В 1825 г. французский химик Жан Батист Дюма (1800—1884 гг.) достиг понижения давления, вытеснив воздух из сосуда водяным паром и сконденсировав его затем охлаждением.

В середине XIX в. немецкий химик Роберт Вильгельм Бунзен (1811—1899 гг.) осуществил откачку газа струей быстро истекающей жидкости, увлекающей газ.

В специальную дисциплину вакуумная техника сформировалась в тесной связи с развитием производства электровакуумных приборов: изобретение в 1873 г. русским ученым А. Н. Лодыгиным первого электровакуумного прибора — электрической лампы накаливания с угольным стержнем, открытие Т. А. Эдисоном в 1883 г. термоэлектронной эмиссии из накаливаемых проводников, открытие в 1887 г. А. Г. Столетовым и Г. Герцем фотоэлектрического эффекта и многие другие открытия и изобретения не только увеличили наши знания в области применения разреженных газов, но и привели к стремительному развитию вакуумной техники.

В 1884 г. итальянец А. Малиньяни впервые применил в производстве вакуумных ламп накаливания связывание остаточных газов парами фосфора и тем самым положил начало применению различного рода газопоглотителей (так называемых геттеров) в электровакуумных приборах. Впоследствии были разработаны геттерные насосы.

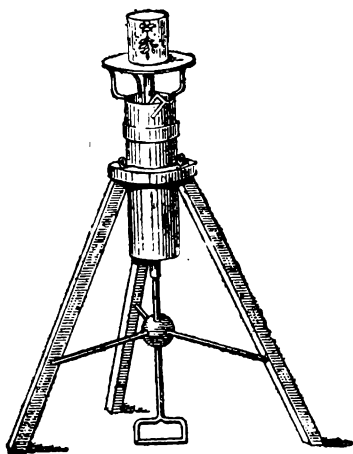


Рис. В1. Первый откачной пост колпакового типа, оснащенный поршневым насосом, двухходовым краном и ножным приводом (старинная гравюра XVII в.).

В 1904 г. Дж. Дьюар разработал способ получения вакуума путем поглощения газов активированным углем, охлаждаемым жидким азотом.

В 1906 г. появляется первый ротационный ртутный насос В. Гедэ, вскоре после чего был разработан многопластинчатый вакуумный насос с масляным уплотне-

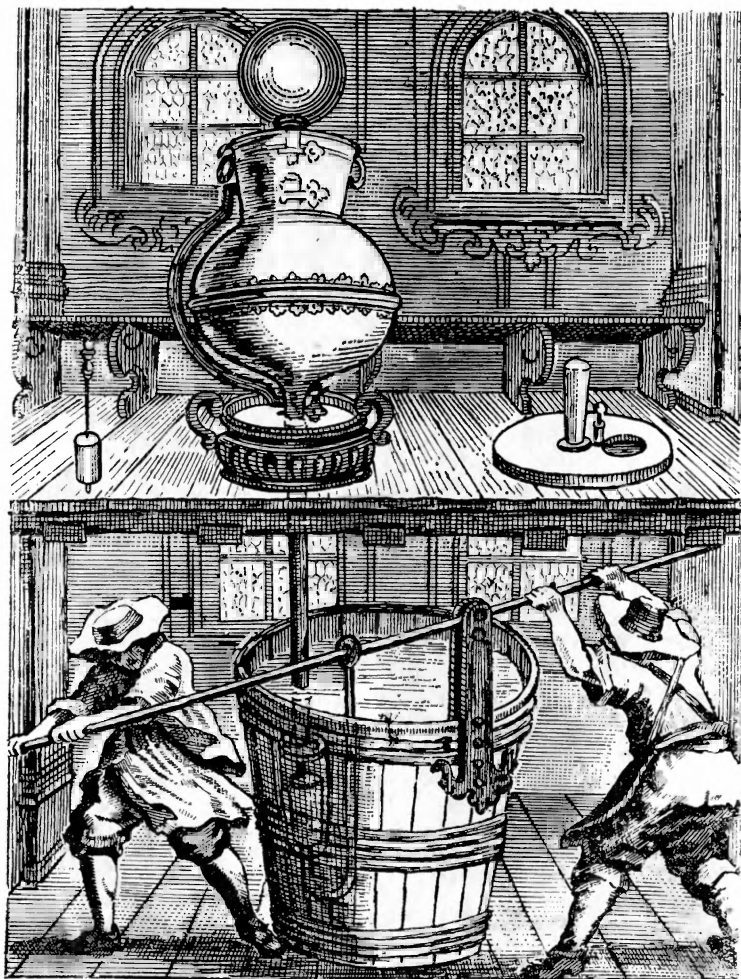


Рис. В2. Получение вакуума с помощью механического поршневого насоса с водяным уплотнением (старинная гравюра XVII в.).

нием, с помощью которого можно было получать давление около 1 Па.

В 1911 г. В. Гедэ сконструировал первый молекулярный насос. В 1914—1916 гг. практически одновременно В. Гедэ, И. Ленгмюр и профессор Петроградского университета С. А. Боровик разработали ртутный диффузионный насос, способный создавать давление около 10^{-5} Па.

В 1928 г. появляется паромасляный диффузионный насос К. Р. Бэрча, затем — большое количество других (механических, пароструйных, молекулярных) насосов, которые и по сей день широко используются в вакуумной технике и непрерывно совершенствуются.

В развитии техники измерения низких давлений следует отметить такие работы, как создание компрессионного манометра Г. Мак-Леодом (1874 г.), теплового манометра М. Пирани (1909 г.) и ионизационного манометра О. Бакли (1916 г.).

Успехам вакуумной техники способствовали многочисленные теоретические и экспериментальные работы; особенно следует отметить работы, проведенные в первые десятилетия XX в. американскими учеными И. Ленгмюром и С. Дэшманом, английским ученым Н. Р. Кэмпбеллом и датским физиком М. Кнудсенom.

Современная вакуумная техника способна обеспечить получение и измерение давления, в 10^8 раз меньшего атмосферного, при котором в 1 см³ остается всего лишь около 30 молекул газа.

В нашей стране до 1917 г. имелись лишь небольшие фабрики вакуумных ламп накаливания (в Москве и Петрограде). Изготовление приемно-усилительных ламп было организовано Н. Д. Папалекси и М. А. Бонч-Бруевичем лишь в 1914 г. в Петрограде и в 1915 г. в Твери. Быстрое развитие отечественной вакуумной техники началось после Великой Октябрьской социалистической революции. Уже в 1918 г. В. И. Ленин дал указание об организации Нижегородской лаборатории, в которой под руководством М. А. Бонч-Бруевича начались разработка и производство генераторных ламп.

В 1919 г. под руководством А. А. Чернышева началась подготовка к массовому изготовлению электронных ламп в Петрограде. Точно так же в 20-х годах в Москве небольшие, разрозненные производства вакуумных ламп накаливания были объединены в единый завод, раз-

вившийся вскоре в мощное электровакуумное предприятие с сетью производственно-исследовательских лабораторий, работавших под руководством А. П. Иванова.

В последующие годы электровакуумные предприятия и научно-исследовательские институты продолжали развиваться по всему Советскому Союзу. Это позволило сделать огромный шаг вперед как в деле разработки и производства новых типов электровакуумных приборов, так и в области специальной вакуумной техники: разработаны и выпускаются более совершенные типы насосов, манометрических преобразователей, измерителей парциальных давлений, течеискателей и различных деталей вакуумных систем. В разработке рациональных вакуумных систем важную роль сыграл опубликованный в 1948 г. фундаментальный труд Г. А. Тягунова «Основы расчета вакуумных систем».

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

В настоящее время трудно назвать такую область науки и промышленности, где бы не использовались достижения вакуумной техники. Упомянем вкратце лишь некоторые области ее применения.

В радиоэлектронике вакуумная техника обеспечила возможность успешной разработки многих новых электронных приборов, предназначенных для увеличения дальности действия, надежности и долговечности средств связи и навигации. Широко используется вакуумная техника в установках получения тонких пленок, для изготовления резисторов, конденсаторов, контактов, функциональных схем и жидкокристаллических ячеек. Изготовление полупроводниковых приборов, элементов солнечных батарей и кварцевых резонаторов также требует применения вакуумной техники.

В электропромышленности вакуумная техника используется в сушильных и пропиточных установках для производства трансформаторов, конденсаторов, кабелей и электродвигателей.

В металлургической промышленности применение вакуума в установках для дегазации сталей, в индукционных плавильных печах, в установках для электродуговой и электронно-лучевой переплавки позволяет заметно улучшить физико-химические свойства металлов. Для получения таких металлов, как титан, ниобий, тантал, цирконий, бериллий и их сплавы, необ-

ходимо создавать разрежения около 10^{-2} — 10^{-4} Па. Получение полупроводниковых материалов и сверхчистых веществ также невозможно без применения вакуумной металлургии.

В химической промышленности применение вакуумных сушильных аппаратов позволяет резко увеличить выпуск таких ценнейших материалов, как синтетические волокна, полиамиды, аминопласты, полиэтилен, органические растворители. Искусственные кристаллы алмаза, рубина, сапфира, используемые в квантовых генераторах, создаются с применением вакуумной техники.

В медицинской и фармацевтической промышленности вакуумная техника широко применяется в установках для прецизионного литья медицинских инструментов, в установках для стерилизации, сублимационной сушки, для производства антибиотиков, синтетических гормонов, витаминов, лечебных сывороток и получения многих других ценнейших продуктов.

В пищевой промышленности широко применяют вакуумные кристаллизационные и дистилляционные установки для производства сахара. Консервирование пищевых продуктов с сохранением их вкусовых и питательных свойств осуществляется вымораживанием в вакууме.

В легкой промышленности напылением металла в вакууме получают фольгированные пластмассы, бумагу и ткани, используемые в качестве отделочных материалов при изготовлении мебели, украшений и т. п.

В авиационной промышленности используют вакуумные установки прецизионного литья для титана и высоколегированных сплавов, установки для сварки электронным лучом в вакууме деталей реактивных двигателей.

В оптической, стекольной и фотопромышленности нанесением тонких пленок в вакууме изготавливают высококачественную оптику, оптические и бытовые алюминированные зеркала.

Велика роль вакуумной техники в научных исследованиях, так как без развития техники получения высокого, а затем и сверхвысокого вакуума не были бы возможны успехи атомной и ядерной физи-

ки, приведшие к практическому использованию атомной энергии и к дальнейшему более глубокому изучению строения вещества. С достижением сверхвысокого вакуума в камерах имитации космического пространства в условиях земной атмосферы стало возможным изучение космоса.

В заключение следует сказать, что от дальнейшего развития вакуумной техники во многом зависят успех изучения новых явлений, разработка новых приборов, создание материалов с новыми свойствами.

Глава первая

ЭЛЕМЕНТЫ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ И ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

1.1. ПОНЯТИЕ ОБ ИДЕАЛЬНОМ ГАЗЕ

Для решения многих задач, возникающих при изучении газов, удобно пользоваться понятием об идеальном газе.

Идеальными газами принято считать такие, у которых:

молекулы можно представить как упругие материальные частицы;

силы межмолекулярного взаимодействия отсутствуют (происходят лишь упругие столкновения между молекулами);

объем, занимаемый собственно молекулами, исчезающе мал по сравнению с объемом, свободным от молекул.

Разреженные газы, с которыми в основном имеет дело вакуумная техника, по своим свойствам очень мало отличаются от идеальных газов. Свойства *реальных газов* начинают отличаться от свойств идеальных газов лишь при высоком давлении и температуре, близкой к температуре сжижения. При этом становится заметным влияние сил межмолекулярного взаимодействия.

1.2. ТЕПЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ И АТОМОВ

Наблюдения за поведением любого вещества: твердого, жидкого или газообразного — приводят к выводу, что молекулы и атомы вещества находятся постоянно в беспорядочном движении. Это беспорядочное движение, в котором всегда находятся молекулы (атомы) вещества, называется тепловым; а теория, в основе которой лежит представление о тепловом движении моле-

кул и атомов, называется *кинетической теорией* материи.

Впервые представление о внутреннем тепловом движении частиц вещества развил М. В. Ломоносов (1744 г.).

Тепловое движение частиц твердого тела носит *колебательный характер*; частицы колеблются около среднего положения с различными амплитудами. Такой характер теплового движения частиц твердого тела обуславливается тем, что между ними имеются прочные связи (силы взаимного притяжения), не позволяющие им двигаться поступательно; поэтому *твердое тело способно самостоятельно сохранять свой объем и форму*.

Тепловое движение молекул жидкости в отличие от твердого тела имеет *смешанный характер*, причем чем выше температура жидкости (т. е. чем интенсивнее тепловое движение), тем легче преодолеваются силы взаимного притяжения между молекулами и тем сильнее преобладает поступательное (зигзагообразное) движение молекул; в связи с этим *жидкость способна сохранять самостоятельно только объем, но не форму*.

Наконец, тепловое движение молекул газообразного вещества имеет только *поступательный характер* с относительно слабым взаимодействием между молекулами, вследствие чего *газообразное вещество неспособно самостоятельно сохранять ни форму, ни объем, а всегда занимает весь предоставленный ему объем*.

На основе представления о хаотическом поступательном тепловом движении молекул газа легко объяснить явления, с которыми приходится сталкиваться при изучении вакуумной техники. Приведем примеры:

1. Хаотическим тепловым движением объясняется способность газов занимать весь предоставленный им объем или проникать друг в друга (диффузия).

2. Тепловым движением молекул объясняются такие важные для вакуумной техники свойства газов, как теплопроводность, т. е. перенос молекулами тепла от более нагретого к менее нагретому телу в газовой среде; как внутреннее трение или вязкость газов, т. е. перенос количества движения от одного слоя газа к другому.

3. Тепловым движением частиц воздуха объясняется такое нежелательное в вакуумной технике явление, как натекание вакуумных систем, т. е. проникновение атмосферного воздуха внутрь вакуумной системы через

неуплотненное (негерметичное) место и даже через стенки оболочки, если стенки изготовлены из газопроницаемого материала.

4. На основе теплового движения и взаимодействия между молекулами газа и твердого тела объясняются явления, происходящие как на поверхности их раздела, так и внутри твердого тела (поглощение и выделение газов твердыми телами).

5. Тепловым движением молекул определяется наличие в любом веществе внутренней энергии.

В реальных газах полная внутренняя энергия складывается из кинетической энергии теплового движения молекул и потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия, причем потенциальная энергия тем больше, чем больше среднее расстояние между молекулами, т. е. чем ниже давление газа.

Поскольку в идеальном газе взаимодействие между молекулами отсутствует, его внутренняя энергия определяется только кинетической энергией теплового движения. Отсюда следует, что определенной температуре газа соответствует определенная скорость движения молекул.

1.3. ДАВЛЕНИЕ И ПЛОТНОСТЬ ГАЗА

Давление газа с точки зрения кинетической теории есть суммарный импульс силы, который вследствие теплового движения сообщается ударами молекул газа в единицу времени единице поверхности. Ударяясь о стенку, каждая молекула с массой m и средней скоростью u передает ей количество движения, равное mu . Отражаясь от стенки с той же скоростью u , молекула как бы отталкивается от нее и таким образом сообщает ей такое же количество движения mu . Следовательно, изменение количества движения при одном ударе одной молекулы равно $mu - (-mu) = 2mu$. Если за 1 с на единицу поверхности стенки приходится N_u ударов молекул, то полное количество движения, переданное этому участку стенки, равно $2N_u mu$. В соответствии со вторым законом Ньютона это количество движения равно произведению силы, действующей на этот участок стенки, на время, в течение которого она действует (в нашем случае 1 с). Таким образом, сила, действующая на единицу поверхности стенки, т. е. давление

$$p = 2N_u mu.$$

Подсчитаем число ударов молекул в 1 с, приходящее на единицу поверхности. Если число молекул в единице объема обозначить N_1 и учесть, что молекулы движутся со скоростью u в шести равновероятных направлениях перпендикулярно граням куба, то в единицу времени в среднем $N_u = (N_1/6)u$ молекул ударится об единицу поверхности. Окончательно имеем:

$$p = 2m u \frac{N_1}{6} u = \frac{1}{3} N_1 m u^2, \quad (1.1)$$

где p — давление;

N_1 — количество молекул в единице объема (молекулярная концентрация);

m — масса молекулы;

u — средняя скорость молекул.

Единицей давления в системе СИ служит паскаль (Па), $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ (ньютон на квадратный метр).

Плотностью газа называется масса газа в единице объема

$$\rho = N_1 m. \quad (1.2)$$

Если учесть уравнение (1.1), то получим:

$$p = \frac{1}{3} \rho u^2 \quad (1.3)$$

или

$$\frac{p}{\rho} = \frac{1}{3} u^2. \quad (1.4)$$

1.4. ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Как уже отмечалось, разреженные газы по своим свойствам близки к идеальным, поэтому найденные опытным путем законы поведения разреженных газов используются для описания идеальных газов. Рассмотрим эти законы.

Закон Бойля—Мариотта. При постоянной массе газа Nm и температуре T произведение давления газа p на его объем V есть величина постоянная:

$$pV = \text{const}. \quad (1.5)$$

Если ввести понятие удельного объема, то можно записать:

$$pV_{\text{уд}} = \text{const}, \quad (1.6)$$

где $V_{\text{уд}} = 1/\rho$ — удельный объем;

ρ — плотность газа.

Сравнивая (1.6) и (1.4), видим, что *при постоянной температуре скорость теплового движения молекул газа остается неизменной.*

В более общем случае, когда постоянной остается только температура, а масса газа Nm меняется, закон Бойля—Мариотта можно записать в виде

$$pV = (\text{const})_1 Nm, \quad (1.7)$$

т. е. *произведение давления газа на его объем при неизменной температуре прямо пропорционально массе газа.* Отсюда следует, что произведением pV можно измерять количество газа, если его температура остается неизменной.

При решении многих задач вакуумной техники бывает удобно количество газа выражать именно в единицах pV , т. е. в $\text{м}^3 \cdot \text{Па} = \text{Н} \cdot \text{м}$.

Кроме того, из уравнений (1.2) и (1.6) следует, что *при постоянной температуре давление газа пропорционально его молекулярной концентрации N_1 и плотности ρ .*

Экспериментально установлено, что при смешении химически не взаимодействующих газов с одинаковой температурой температура смеси остается той же, что и у газов до смешения. Отсюда следует, что *при одной и той же температуре средняя кинетическая энергия молекул одинакова для всех газов.*

Закон Авогадро. Умножив обе части уравнения (1.1) на V , получим:

$$pV = \frac{1}{3} N m u^2 = \frac{2}{3} N \frac{m u^2}{2}, \quad (1.8)$$

где $N = N_1 V$.

Из уравнения (1.8) следует, что в равных объемах V при одинаковых давлениях p и температурах ($m u^2/2 \sim T$) содержится одинаковое число молекул различных газов.

Из уравнения (1.8) следует также, что *при равных температурах и давлениях равные объемы газов V содержат одинаковое количество молекул N .* Этот вывод называется законом Авогадро.

На основании закона Авогадро молекулярная масса M любого газа или пара определяется как выраженная в килограммах масса такого количества газа, которое при 273 К и давлении $1,02 \cdot 10^5$ Па занимает объем 22,41 м^3 . Эта масса газа называется килограмм-молекулой (киломолем). Довольно часто при расчетах исполь-

зуется в тысячу раз меньшая величина, называемая грамм-молекулой (молем) и представляющая собой массу молекул газа, выраженную в граммах, которая при тех же условиях (273 К, $1,02 \cdot 10^5$ Па) занимает объем $V = 22,41$ л.

Один моль газа содержит $N_A = 6,0228 \cdot 10^{23}$ молекул. N_A называется *числом Авогадро*. Число молекул, содержащихся в 1 см³ при 273 К и $1,02 \cdot 10^5$ Па, называется *числом Лошмидта*: $N_L = 2,687 \cdot 10^{19}$ молекул/см³.

Закон Гей-Люссака. При постоянной массе Nm и давлении p объем газа пропорционален его абсолютной температуре:

$$V = \text{const } T. \quad (1.9)$$

Закон Шарля. При постоянной массе Nm и объеме V давление газа пропорционально его абсолютной температуре:

$$p = \text{const } T. \quad (1.10)$$

Закон Дальтона. Полное давление смеси химически не взаимодействующих газов равно сумме парциальных давлений отдельных газов. *Парциальным* давлением газа, входящего в смесь, называется давление, которое этот газ имел бы, если бы в объеме, занимаемом смесью, был только он один.

Итак, согласно закону Дальтона

$$p_{\text{см}} = p_1 + p_2 + \dots + p_n, \quad (1.11)$$

где $p_{\text{см}}$ — полное давление смеси;

$p_1, p_2, \dots, p_n$ — парциальные давления газов, составляющих смесь.

Действительно, если выразить количество смеси и отдельных газов в единицах pV , то, очевидно,

$$p_{\text{см}} V_{\text{см}} = p_1 V_{\text{см}} + p_2 V_{\text{см}} + \dots + p_n V_{\text{см}},$$

где $V_{\text{см}}$ — объем смеси.

После сокращения на $V_{\text{см}}$ получаем уравнение (1.11).

1.5. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Уравнение состояния идеальных газов является результатом обобщения законов идеальных газов и записывается следующим образом:

$$pV = kTN, \quad (1.12)$$

где k — коэффициент пропорциональности, называемый *постоянной Больцмана* ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);
 T — абсолютная температура газа;
 N — число молекул.

Для одного киломоля газа уравнение (1.12) примет вид:

$$pV_0 = kTN_A = R_0T, \quad (1.13)$$

где $R_0 = kN_A$ — *универсальная газовая постоянная*, одинаковая для всех газов, $R_0 = 1,986$ кал/(К·кмоль) $= 8,314 \cdot 10^3$ Дж/(К·кмоль);
 N_A — число Авогадро;
 V_0 — объем одного киломоля газа.

В общем виде уравнение (1.13) записывается следующим образом:

$$pV = n_m R_0 T, \quad (1.14)$$

где $n_m = N/N_A$ — число киломолей газа в объеме V .

Приравнивая правые части уравнений (1.8) и (1.14) и решая относительно u , получаем:

$$u = \sqrt{\frac{3n_m R_0 T}{Nm}} = \sqrt{\frac{3R_0 T}{M}} = 158 \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (1.15)$$

где $M = N_A m$ — молекулярная масса газа.

Таким образом, *средняя квадратичная скорость теплового движения молекул газа пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры и обратно пропорциональна квадратному корню из молекулярной массы газа.*

Сопоставление уравнений (1.8) и (1.12) приводит к соотношению

$$\frac{mu^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1.16)$$

т. е. *средняя кинетическая энергия теплового движения молекул газа пропорциональна его абсолютной температуре.*

Соотношение (1.16) позволяет сделать также следующий важный вывод. Возьмем n любых газов и составим для них выражения средней кинетической энергии молекул:

$$\frac{m_1 u_1^2}{2}, \frac{m_2 u_2^2}{2}, \dots, \frac{m_n u_n^2}{2}.$$

Если температура всех газов одинакова, то, поскольку каждое из выражений в отдельности равно $3/2 kT$,

имеем:

$$\frac{m_1 u_1^2}{2} = \frac{m_2 u_2^2}{2} = \dots = \frac{m_n u_n^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

т. е. при одинаковой температуре средняя кинетическая энергия теплового движения молекул любого газа одинакова и равна $3/2 kT$.

1.6. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Описание газовых законов дополним рассмотрением уравнения состояния реальных газов, так как при значительном повышении давления (плотности) газа начинает сказываться влияние сил межмолекулярного взаимодействия и собственного объема молекул, которые, как мы знаем, в уравнении состояния идеального газа не учитываются (см. также § 1.4).

Из предложенных различными авторами уравнений состояния реальных газов наиболее удачным считается уравнение Ван-дер-Ваальса (1873 г.), имеющее следующий вид:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V_0 - b) = R_0 T, \quad (1.17)$$

где p — давление;

V_0 — объем киломоля газа;

a и b — постоянные величины, зависящие от рода газа;

R_0 — универсальная газовая постоянная;

T — температура газа.

Поправка a/V^2 учитывает влияние так называемых ван-дер-ваальсовых сил, которые обусловлены электромагнитными и квантовыми взаимодействиями между молекулами газа. По мере сближения молекул происходят такие перегруппировки их зарядов, что сначала действуют силы взаимного притяжения, возрастающие при сближении молекул, а затем — силы их взаимного отталкивания. Пройдя через положение, при котором силы притяжения и отталкивания уравниваются, молекулы под действием быстро возрастающих сил взаимного отталкивания разлетаются в разных направлениях.

Силы взаимодействия между молекулами внутри объема газа направлены во все стороны и, следовательно, взаимно уравниваются, но они сказываются на краевых молекулах, находящихся вблизи стенок сосуда, содержащего газ, и проявляются в виде допол-

нительного слагаемого к давлению p . Это значит, что в данном объеме газ удерживается не только внешним давлением p , оказываемым стенками, но частично и внутренними силами межмолекулярного взаимодействия в самом газе. Таким образом, поправка a/V_0^2 представляет собой «внутреннее» давление в газе.

Поправкой b учитывается влияние собственного объема молекул, за счет которого уменьшается объем, свободный от молекул.

Уравнение Ван-дер-Ваальса позволяет с гораздо большей точностью, чем уравнение (1.14), определять параметры состояния газов при повышенных давлениях. Так, например, при давлении $5 \cdot 10^7$ Па уравнение (1.17) при определении объема киломоля дает ошибку 1,4%, а уравнение (1.14) — 39%. Однако при давлениях, меньших 10^5 Па, оба уравнения дают близкие и достаточно точные для практики результаты.

Задача 1.1. Баллон, содержащий газ при давлении $1 \cdot 10^5$ Па, имеет объем 5 л. Как изменится давление газа в баллоне, если его сообщить с другим баллоном, практически не содержащим газа и имеющим объем 20 л (температуру газа предполагаем постоянной)?

Ответ: давление снизится на $8 \cdot 10^4$ Па.

Задача 1.2. Газонаполненная лампа накаливания в холодном состоянии (300 К) содержит газ под давлением $8 \cdot 10^4$ Па. Какое давление газа установится во включенной лампе, если накаливаемая нить нагреет его до средней температуры 450 К?

Ответ: $1,2 \cdot 10^5$ Па.

Задача 1.3. Определить молекулярную концентрацию любого газа при давлениях 100 000; 100; 0,1; 10^{-4} ; 10^{-7} ; 10^{-10} и 10^{-13} Па и температуре 300 К.

Ответ: при 10^5 Па $2,43 \cdot 10^{25}$ молекул/м³

» 10^2 Па $2,43 \cdot 10^{22}$ »
 » 10^{-1} Па $2,43 \cdot 10^{19}$ »
 » 10^{-4} Па $2,43 \cdot 10^{16}$ »
 » 10^{-7} Па $2,43 \cdot 10^{13}$ »
 » 10^{-10} Па $2,43 \cdot 10^{10}$ »
 » 10^{-13} Па $2,43 \cdot 10^7$ »

Задача 1.4. Определить объем киломоля газа при 10^5 Па и 300 К.

Ответ: примерно 25 м³.

Задача 1.5. Смесь азота и кислорода занимает объем 0,5 л. Определить парциальные давления этих газов, если полное давление смеси составляет 100 Па, причем при давлении 100 Па азот занимал бы объем 0,4 л, а кислород 0,1 л.

Ответ: 80 и 20 Па.

1.7. ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ ГАЗА ПО СКОРОСТЯМ

Как мы уже говорили, скорости теплового движения отличаются не только по величине, но и по направле-

нию, а тепловое движение молекул хаотично. Как же при этих условиях можно говорить об определенном значении средней скорости, зависящей от температуры и молекулярной массы газа?

Очевидно, для характеристики состояния газа следует говорить о средней скорости одной молекулы за длительный промежуток времени или средней скорости всех молекул газа в данном объеме в какой-нибудь момент времени.

В § 1.4 шла речь о средней квадратичной скорости, с помощью которой очень удобно характеризовать кинетическую энергию молекул газа. Значение средней квадратичной скорости может быть найдено из формулы (1.15).

Максвелл (1860 г.) показал, что газ, не подвергающийся какому-либо постороннему механическому или температурному воздействию, всегда приходит в такое состояние, когда молекулы распределяются по скоростям теплового движения, следуя вполне определенному статистическому закону. На основе этого закона можно подсчитать значение *наиболее вероятной*, т. е. относительно наиболее часто встречающейся у молекул, скорости теплового движения, м/с:

$$u_b = \sqrt{\frac{2R_0T}{M}} = 129 \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (1.18)$$

Подсчет *средней арифметической скорости* молекул газа, т. е. $u_a = (u_1 + u_2 + \dots + u_N)/N$, где $u_1, u_2, \dots, u_N$ — скорости молекул, а N — их число, дает следующее значение средней арифметической скорости u_a , м/с:

$$u_a = \sqrt{\frac{8R_0T}{\pi M}} = 145,51 \sqrt{\frac{T}{M}} = 1,128u_b. \quad (1.19)$$

Для *средней квадратичной скорости* на основании закона распределения Максвелла получается выражение

$$u = \sqrt{\frac{3R_0T}{M}} = 158 \sqrt{\frac{T}{M}} = 1,22u_a, \quad (1.20)$$

которое совпадает с выражением (1.15), выведенным нами из сопоставления уравнений (1.8) и (1.14).

Представление о характере закона распределения молекул газа по скоростям можно получить из рассмот-

Таблица 1.1

Распределение молекул газа по скоростям

Пределы относительных значений скоростей ($u_B = 1$)	Относительные, %, количества молекул ($N = 100\%$)	Пределы относительных значений скоростей ($u_B = 1$)	Относительные, %, количества молекул ($N = 100\%$)
0—0,1	0,08	1,5—1,5	12,44
0,1—0,3	1,85	1,5—1,7	8,94
0,3—0,5	6,19	1,7—1,9	5,76
0,5—0,7	11,27	1,9—2,2	4,36
0,7—0,9	15,14	2,2—2,5	1,57
0,9—1,1	16,58	2,5—3,0	0,55
1,1—1,3	15,33	—	—

рения рис. 1.1, где показаны графики распределения молекул по скоростям при двух температурах ($T_2 > T_1$).

Общее количество молекул, характеризующее площадь, заключенной между кривой и осью абсцисс, принято одинаковым. Как видно, возрастание температуры приводит к сдвигу максимума кривой в сторону больших скоростей.

Таблица 1.1 иллюстрирует закон распределения молекул по скоростям в относительных величинах. В левом столбце таблицы указаны пределы относительных значений скоростей, причем значение наиболее вероятной скорости принято за единицу ($u_B = 1$). В правом столбце приведены относящиеся на эти пределы относительные количества молекул в процентах ко всему количеству молекул газа ($N = 100\%$).

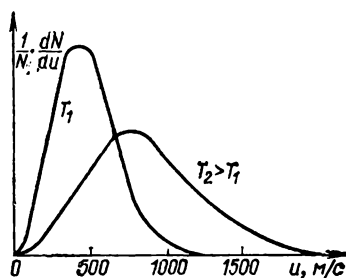


Рис. 1.1. Распределение молекул газа по скоростям $\left(\frac{1}{N} \frac{dN}{du} \right)$ — концентрация молекул с данной скоростью u , м/с).

Как видно, при любой температуре сравнительно небольшое количество молекул обладает очень малыми скоростями. По мере роста скоростей относительные доли молекул постепенно возрастают, и эта доля становится самой большой (16,58%) при наиболее вероятной скорости (пределы скоростей от 0,9 до 1,1 u_B). При дальнейшем росте скоростей молекул доли опять стано-

вятся все меньшими. Таблица показывает, что примерно 70% всех молекул обладает скоростями от 0,5 до 1,5 u_v .

Закон распределения по скоростям позволяет однозначно определять значения средних скоростей теплового движения молекул в зависимости от температуры и молекулярной массы газа.

Таблица 1.2

Средние квадратичные скорости u теплового движения молекул некоторых газообразных веществ

Газ или пар	Молекулярная масса, кг	Средняя квадратичная скорость, м/с	
		при 273 К	при 293 К
Водород H_2	2	1838	1904
Азот N_2	28	493	511
Кислород O_2	32	461	478
Ртутный пар	201	184	191

Представление об абсолютных значениях скорости теплового движения молекул различных газообразных веществ дает табл. 1.2, из которой видно, что средние скорости молекул значительны и примерно в полтора раза превышают скорость звука.

В формулах кинетической теории газов используются всегда средние значения скоростей теплового движения; причем если имеет значение только скорость молекулы, учитывается средняя арифметическая скорость, а когда имеет значение кинетическая энергия, учитывается средняя квадратичная скорость.

1.3. СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПУТИ

Тепловое движение молекул сопровождается не только ударами молекул о стенки сосуда, в котором заключен газ, но и их взаимными столкновениями. Вследствие этого путь молекулы газа при тепловом движении представляет собой, вообще говоря, пространственную ломаную линию, прямолинейные участки которой соответствуют свободному пути молекулы (без столкновений) (рис. 1.2); точки, где молекула меняет свое направление, соответствуют моментам столкновения данной молекулы с какой-либо другой. Поскольку тепловое движение беспорядочно, прямолинейные пути молекул между двумя столкновениями не могут быть одинаковы; тем не менее благодаря существованию определенного за-

кона распределения мы и здесь сможем аналогично понятию о средней скорости теплового движения ввести понятие о среднем расстоянии, проходимом молекулами между двумя столкновениями, или, короче, о *средней длине свободного пути* молекул газа (обозначим ее через λ).

Рис. 1.2. Тепловое движение молекулы газа.

1, 2, 3 и т. д. — места столкновений с другими молекулами.



Как уже отмечалось, с целью упрощения обычно полагают, что молекулы имеют сферическую форму и что молекулы взаимодействуют друг с другом подобно твердым абсолютно упругим телам, т. е. взаимодействие имеет место только при расстоянии между центрами молекул, меньшем эффективного диаметра молекулы σ . При этом надо иметь в виду, что силы, действующие между реальными молекулами, гораздо сложнее сил упругости. Так, в отличие от твердых сфер при некотором увеличении расстояния между молекулами возникает слабое притяжение. Столкновение между молекулами можно строго описать с помощью эффективной поверхности, равной $\pi\sigma^2$, но при этом эффективный диаметр σ зависит от температуры и относительной скорости молекул, и, таким образом, понятие об эффективном диаметре является не вполне определенным.

Определяя среднюю длину свободного пути, мы считаем, что вероятность того, что в течение некоторого малого интервала времени dt молекула испытывает столкновение с какой-либо другой молекулой, не зависит от того, какой была траектория ее движения. Среднее время τ движения молекулы до следующего столкновения назовем *средним временем свободного пути* молекулы.

Пренебрегая распределением молекул по скоростям, при дальнейшем рассуждении полагаем, что молекулы движутся в случайных направлениях с одинаковой скоростью, равной их средней скорости.

Так как столкновения молекул друг с другом происходят только при расстояниях между ними меньше σ , то объем цилиндра диаметром σ , описываемый молекулой за 1 с, движущейся относительно других молекул со скоростью $u_{отн}$, будет равен $\pi\sigma^2 u_{отн}$. Так как в единице объема содержится N_1 молекул, то число столкновений в единицу времени, которое испытывает одна молекула, составит $\pi\sigma^2 u_{отн} N_1$. Следовательно, средняя длина свободного пути

$$\lambda = \frac{u_a}{\pi\sigma^2 u_{отн} N_1}. \quad (1.21)$$

Так как движутся обе сталкивающиеся молекулы, то, считая их скорости одинаковыми, получаем в соответствии с законом косинуса:

$$u_{отн} = \sqrt{u_a^2 + u_a^2 - 2u_a^2 \cos \theta},$$

где θ — угол между векторами скоростей молекул.

Так как θ с равной вероятностью может принимать как положительные, так и отрицательные значения, то можно полагать произведение $2u^2_a \cos \theta = 0$ и тогда

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} N_1 \pi \sigma^2}. \quad (1.22)$$

При выводе формулы (1.22) предполагалось, что σ постоянна при изменении температуры. Для учета влияния температуры на σ в формулу вводят поправочный коэффициент, полученный экспериментально, тогда

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} N_1 \pi \sigma^2 (1 + C/T)}, \quad (1.23)$$

где T — температура, К;

C — постоянная, зависящая от рода газа.

Если среднюю длину свободного пути молекулы при 273 К обозначить через λ_{273} , а при температуре T — через λ_T , то, пользуясь формулой (1.23), нетрудно подсчитать:

$$\lambda_T = \lambda_{273} \frac{(273 + C)T}{(T + C) \cdot 273}. \quad (1.24)$$

По формуле (1.24) можно определить длину свободного пути при любой температуре, если она известна при 273 К.

Например, для воздуха при температуре 298 К и давлении 10^5 Па, используя данные, указанные в приложении 1, можем написать:

$$\lambda_{298} = 5,98 \cdot 10^{-8} \frac{(273 + 112) \cdot 298}{(298 + 112) \cdot 273} \approx 6,2 \cdot 10^{-8} \text{ м.}$$

Далее из формулы (1.12) следует:

$$N_1 = \frac{p}{kT}, \quad (1.25)$$

так как

$$N_1 = N/V.$$

С учетом (1.25) получим из (1.23)

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p \left(1 + \frac{C}{T}\right)}. \quad (1.26)$$

Таким образом, при постоянной температуре для определенного газа произведение

$$p\lambda = \text{const} = \lambda', \quad (1.27)$$

где λ' — средняя длина свободного пути молекул газа при $p=1$ Па.

На основе соотношения (1.27) и вычисленного выше значения λ_{298} составлена табл. 1.3, в которой указаны значения λ для воздуха при различных давлениях и температуре 298 К.

Таблица 1.3

Средняя длина свободного пути молекул воздуха при 298 К

Давление воздуха, Па	Средняя длина свободного пути молекулы воздуха, м	Давление воздуха, Па	Средняя длина свободного пути молекулы воздуха, м
$1 \cdot 10^5$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$
$1,333 \cdot 10^2$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^0$
$1 \cdot 10^2$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10$
10	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^2$
1	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^3$
$1 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^4$

Из табл. 1.3 видно, что при температуре 298 К для воздуха $\lambda'=6,2 \cdot 10^{-3}$ м·Па. Следовательно, среднюю длину свободного пути молекул воздуха при любом давлении можно определить по уравнению

$$\lambda_{298} = \frac{6,2 \cdot 10^{-3}}{p}, \text{ м.}$$

1.9. ОБЪЕМ ГАЗА, ЗАНИМАЕМЫЙ МОЛЕКУЛАМИ, УДАРЯЮЩИМИСЯ О ПОВЕРХНОСТЬ СТЕНКИ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ

Число молекул газа, ударяющихся о единичную поверхность стенки сосуда, содержащего газ, в единицу времени согласно кинетической теории равно:

$$N_u = \frac{N_1 u_a}{4}, \quad (1.28)$$

где N_1 — число молекул в единице объема;

u_a — средняя арифметическая скорость молекул.

Таким образом, N_u пропорционально скорости теплового движения молекул u_a и молекулярной концентрации N_1 , а следовательно, при неизменной температуре пропорционально давлению газа.

Для практических целей часто бывает важно знать не число молекул N_u , ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени, а объем газа V_1 , занимаемый

молекулами, ударяющимися о единицу поверхности в единицу времени.

Для вывода формулы объема V_1 надо обе части уравнения (1.28) разделить на молекулярную концентрацию N_1 и подставить значение u_a из уравнения (1.19):

$$V_1 = u_a/4 = 36,38 \sqrt{T/M}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (1.29)$$

Объем газа, ударяющийся в единицу времени о поверхность A , м^2 , равен:

$$V_A = 36,38 A \sqrt{T/M}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (1.30)$$

Поскольку в формулу (1.30) молекулярная концентрация газа не входит, то V_A не зависит от давления газа.

Формула (1.30) используется при определении быстроты действия высоковакуумных насосов, ловушек для вымораживания паров, газопоглотителей (геттеров), а также для вычисления проводимости отверстий при высоком вакууме и т. д.

Задача 1.6. Определить внутреннюю кинетическую энергию газа, находящегося в замкнутом сосуде объемом 200 см^3 , если давление газа равно 10^5 Па .

Ответ: 30 Дж.

Задача 1.7. Определить среднюю арифметическую скорость атомов ртутного пара при температуре 200 К .

Ответ: $145,5 \text{ м/с}$.

Задача 1.8. Определить среднюю квадратичную скорость молекул водорода при температуре 200 К .

Ответ: 1580 м/с .

Задача 1.9. Вычислить объем, занимаемый молекулами воздуха, ударяющимися в единицу поверхности стенки сосуда в 1 с при температуре 293 К (молекулярную массу воздуха можно считать равной в среднем 29).

Ответ: $116 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Задача 1.10. Подсчитать число молекул воздуха, находящихся в 1 см^3 при температуре 273 К и давлениях 10^2 , 10^{-5} и 10^{-9} Па .

Ответ: $2,65 \cdot 10^{18} \text{ 1/см}^3$; $2,65 \cdot 10^9 \text{ 1/см}^3$ и $2,65 \cdot 10^5 \text{ 1/см}^3$.

Задача 1.11. Подсчитать число молекул воздуха при температуре 273 К и давлениях 10^2 , 10^{-5} и 10^{-9} Па , ударяющихся в 1 см^2 поверхности (принять $M_{\text{возд}}=29$).

Ответ: $2,96 \cdot 10^{20} \text{ 1/см}^2 \cdot \text{с}$; $2,96 \cdot 10^{13} \text{ 1/см}^2 \cdot \text{с}$ и $2,96 \cdot 10^9 \text{ 1/см}^2 \cdot \text{с}$.

1.10. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

Явления переноса имеют место в системах, находящихся в *неравновесном состоянии*. При этом особый интерес представляют процессы, приводящие в конце концов систему, находящуюся в неравновесном состоя-

нии, в равновесное. *Неравновесное состояние характеризуется какими-либо местными отличиями состояния газа, причем в результате теплового движения молекул эти отличия постепенно выравниваются.* Когда через систему вследствие теплового движения молекул переносится масса, явление называют *диффузией*. Перенос количества движения называют *внутренним трением*. При переносе энергии говорят о *теплопроводности*.

Пусть по объему неравномерно распределены масса, количество движения или энергия. Обозначим одну из величин через f . Предположим, что f неравномерно распределена только вдоль оси Z , а в плоскостях, параллельных плоскости XU , ее распределение одинаково. При этом f является функцией лишь одной координаты Z .

Отметим, что перенос f происходит в разных направлениях неодинаково. Так, в направлении оси Z , перпендикулярном XU , перенос будет наибольшим. Очевидно, что чем больше разница концентраций f , тем больше ее перенос. Обычно рассматривается перенос f в направлении нормали к поверхности одинаковой концентрации XU .

Выберем две произвольные параллельные плоскости с координатами Z_1 и Z_2 , находящиеся на расстоянии Z друг от друга.

Примем, что f в плоскости с координатой Z_1 составляет $f(Z_1)$, а в плоскости с координатой Z_2 — $f(Z_2)$. Тогда перенос в направлении оси Z между этими плоскостями составит:

$$f = K_f \frac{f(Z_2) - f(Z_1)}{Z} A, \quad (1.31)$$

или при $Z \rightarrow 0$

$$f = K_f \frac{d[f(Z)]}{dZ} A, \quad (1.32)$$

где K_f — коэффициент, учитывающий число и характеристики молекул, участвующих в переносе;

$\frac{d[f(Z)]}{dZ}$ — градиент f , переносимый одной молекулой;

A — площадь поверхности, через которую осуществляется перенос f .

Теперь рассмотрим явление переноса с точки зрения кинетической теории.

Количество молекул, которые пересекают единицу площади за единицу времени в направлении оси Z , равно $\frac{1}{6} N_1 u_a$.

Поскольку к плоскости с координатой Z приходят без столкновения молекулы, находящиеся на расстоянии среднего свободного пути λ с обеих сторон от этой плоскости, т. е. от плоскостей с координатами $Z+\lambda$ и $Z-\lambda$, то изменение u выбранной плоскости составит $f(Z+\lambda) - f(Z-\lambda)$.

Представим $f(Z+\lambda)$ и $f(Z-\lambda)$ степенными рядами, ограничившись первым членом разложения в ряд:

$$f = (Z + \lambda) = f(Z) + \lambda \frac{d[f(Z)]}{dZ}$$

и

$$f = (Z - \lambda) = f(Z) - \lambda \frac{d[f(Z)]}{dZ}.$$

Тогда изменение f вблизи выбранной плоскости будет равно:

$$f(Z + \lambda) - f(Z - \lambda) = 2\lambda \frac{d[f(Z)]}{dZ}. \quad (1.33)$$

Таким образом, полное значение переносимой величины f через поверхность площадью A в единицу времени равно:

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{6} N_1 u_a \cdot 2\lambda \frac{d[f(Z)]}{dZ} A = \frac{1}{3} N_1 u_a \lambda \frac{d[f(Z)]}{dZ} A = \\ &= \frac{1}{3} u_a \lambda \frac{d[N_1 f(Z)]}{dZ} A. \end{aligned} \quad (1.34)$$

Теперь перейдем к рассмотрению частных случаев явлений переноса. Начнем с явления внутреннего трения.

1.11. ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В ГАЗАХ

Явление внутреннего трения заключается во взаимодействии слоев текущего газа.

Если в газовой среде находятся две пластины, из которых одна неподвижна ($v_0 = 0$), а другая движется параллельно первой со скоростью v , то все слои газа приходят в движение с определенными скоростями, убывающими от подвижной пластины к неподвижной.

На неподвижную пластину при этом будет действовать сила, направленная в сторону движения подвижной пластины.

Эта сила возникает в результате переноса количества движения между слоями движущегося с разными скоростями газа. В самом деле можно записать, что в единицу времени через площадку A переносится следующее количество движения:

$$\frac{Ad(mvN_1)}{dt} = \frac{Ad(\rho v)}{dt} = F,$$

где F — сила трения между слоями движущегося газа (в соответствии со вторым законом Ньютона производная по времени от количества движения равна действующей силе).

С другой стороны, в соответствии с (1.32) можно записать:

$$f = K_f \frac{Ad(\rho v)}{dz} = K_f \rho A \frac{dv}{dz} = F. \quad (1.35)$$

Произведение $K_f \rho$ обычно называют *коэффициентом внутреннего трения или коэффициентом динамической вязкости* и обозначают буквой η .

Таким образом, при площади пластины A сила трения газа будет:

$$F = \eta A \frac{dv}{dz}. \quad (1.36)$$

С точки зрения кинетической теории явление внутреннего трения заключается в переносе молекулами количества движения от слоев, движущихся с большей скоростью, к слоям, движущимся с меньшей скоростью. Это приращение количества движения и определяет силу, действующую между слоями.

Физическую природу этого явления можно выяснить, воспользовавшись для этого полученным нами уравнением переноса (1.34), полагая, что при явлении внутреннего трения роль f выполняет количество движения mv , которым обладают молекулы вследствие движения слоев газа. Тогда сила трения

$$F = \frac{1}{3} N_1 u_a \lambda A \frac{d(mv)}{dz}. \quad (1.37)$$

Сравнивая (1.37) с (1.36), находим:

$$\eta = \frac{1}{3} N_1 u_a \lambda m = \frac{1}{3} \rho u_a \lambda. \quad (1.38)$$

Если распределение молекул газа по скоростям отличается от равновесного, соответствующего закону Максвелла (см. табл. 1.1), то оказывается, что

$$\eta = 0,449 \rho u_a \lambda. \quad (1.39)$$

Значения η для различных газов даны в приложении 1. Так как в правую часть выражения (1.39) входит не зависящее от давления газа произведение $\rho\lambda$, коэффициент внутреннего трения газа при средних давлениях также не зависит от давления. Например, уменьшение плотности газа ρ , а следовательно, и концентрации молекул N_1 , являющихся переносчиками количества движения, компенсируется соответствующим уменьшением потерь количества движения при их взаимных столкновениях.

Выражение (1.39) показывает, что вязкость газа пропорциональна u_a и, следовательно, увеличивается с температурой. Характерно, что для жидкостей коэффициент вязкости с ростом температуры уменьшается.

При малых давлениях газа длина свободного пути λ может быть соизмеримой или даже существенно большей расстояния между движущимися пластинами. При этом явление внутреннего трения в виде передачи количества движения от одного слоя газа к другому существовать, очевидно, не может, так как передача количества движения от движущейся пластины к неподвижной происходит непосредственно отдельными молекулами, отлетающими с добавочной скоростью от движущейся пластины. Наоборот, молекулы газа, отлетающие от неподвижной пластины, попадая непосредственно на движущуюся пластину, оказывают на нее тормозящее действие.

Такую передачу количества движения от движущейся пластины к неподвижной посредством отдельных, независимо (без взаимных столкновений) перелетающих между пластинами молекул иногда называют *молекулярной вязкостью*. Очевидно, *ввиду отсутствия потерь на взаимные столкновения молекулярная вязкость должна быть прямо пропорциональна числу переносчиков количества движения и, следовательно, давлению газа.*

1.12. ДИФфуЗИЯ ГАЗОВ

Диффузия газов заключается в постепенном проникновении одного газа в другой. Диффузия наблюдается только при различной концентрации газа в раз-

ных частях сосуда. В результате диффузии концентрации газов постепенно выравниваются во всем объеме сосуда.

Различие между явлениями диффузии и внутреннего трения, рассмотренного выше, заключается в переносе массы газа, а не количества движения. Поэтому по аналогии с уравнением (1.36) можно записать:

$$M' = D \frac{d\rho}{dz} A, \quad (1.40)$$

где M' — масса газа, переносимая в направлении оси Z в единицу времени (массовый поток газа);

D — коэффициент диффузии;

$\frac{d\rho}{dz}$ — градиент плотности газа вдоль оси Z ;

A — площадь поверхности, через которую диффундирует газ.

Если отнести массу газа к единице поверхности, то выражение (1.40) примет вид:

$$M'_{\text{уд}} = D \frac{d\rho}{dz}, \quad (1.41)$$

где $M'_{\text{уд}}$ — удельный массовый поток газа.

В ряде случаев удобно оперировать объемными величинами.

Если в формуле (1.40) заменить ρ на $N_1 m_1$ и разделить правую и левую части уравнения на m_1 , то получим:

$$q' = D \frac{dN_1}{dz}, \quad (1.42)$$

где $q' = \frac{M'}{m_1}$ — удельный поток молекул газа;

N_1 — объемная концентрация газа, масса молекулы которого равна m_1 .

Уравнение (1.41) описывает *стационарный процесс диффузии* и называется *первым законом Фика*.

Для рассмотрения явления диффузии с точки зрения кинетической теории воспользуемся уравнением (1.35), полагая, что роль f при диффузии газов играет масса молекул, проходящих в единицу времени в направлении уменьшения концентрации данного газа. При этом уравнение (1.35) можно записать следующим образом:

$$M' = \frac{1}{3} u_a \lambda \frac{d(N_1 m)}{dz} = \frac{1}{3} u_a \lambda \frac{d\rho}{dz}. \quad (1.43)$$

Сравнение (1.43) с (1.41) показывает, что

$$D = \frac{1}{3} u_a \lambda. \quad (1.44)$$

Таким образом, мы видим, что в области средних давлений, когда длина свободного пути λ меньше размеров сосуда, коэффициент диффузии D пропорционален средней скорости теплового движения и средней длине свободного пути, т. е. диффузия происходит тем скорее, чем выше температура и меньше давление газа.

Сопоставляя выражения (1.39) и (1.44), можно получить соотношение между коэффициентом диффузии D и динамической вязкостью η :

$$D = 0,668 \eta / \rho. \quad (1.45)$$

Уравнение (1.42) характеризует явление диффузии для случая, когда градиенты концентрации молекул газов с помощью посторонних источников и стоков поддерживаются постоянными, причем молекулы обоих газов обладают равными или близкими значениями средней скорости u_a и среднего свободного пути λ . Это условие практически выполняется для газов с близкими значениями молекулярной массы, находящихся при равных температурах.

В общем случае, когда газы имеют различные параметры, как вывод, так и само выражение коэффициента диффузии существенно усложняются.

Выражения (1.42)—(1.44) могут быть также применены для определения потока газа, диффундирующего через какую-либо перегородку, если концентрация газа по обе стороны перегородки остается постоянной во времени. При этом необходимо лишь воспользоваться значением коэффициента диффузии газа в материале перегородки, который определяется экспериментально (см. приложение 5).

В ряде случаев имеет место процесс диффузии, при котором концентрация газа меняется во времени. Это наблюдается, например, при смешении двух газов, находящихся в ограниченных объемах, которые были разделены до какого-то времени перегородкой, затем разрушенной. При этом общее число участвующих в процессе диффузии молекул остается постоянным, а концентрация и переносимая масса меняются во времени. Такое же явление будет иметь место при удалении растворен-

ных в металле или каком-либо ином твердом теле газов. В этом случае концентрация газов на поверхности твердого тела остается постоянной и весьма малой (условно равной нулю), а в толще твердого тела постепенно со временем концентрация газа уменьшается.

Этот процесс называется *нестационарным процессом диффузии* и описывается уравнением, носящим название *второго закона Фика*:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N_1}{\partial Z^2}, \quad (1.46)$$

где $\frac{\partial N_1}{\partial t}$ — скорость изменения концентрации газа;

$\frac{\partial^2 N_1}{\partial Z^2}$ — изменение градиента концентрации в направлении координаты Z .

Частные случаи решений уравнения (1.46), представляющие практический интерес, приведены в гл. 4.

Пример 1.12. Рассчитать поток кислорода, диффундирующего из воздуха через отверстие в стенке большой камеры, наполненной азотом. Площадь отверстия равна 1 см^2 , толщина стенки 1 см , давление и температура азота в камере равны соответственно $1,02 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и 298 К и не отличаются от давления воздуха в окружающем пространстве.

Решение. Поскольку параметры азота близки к параметрам воздуха и кислорода во внешнем пространстве, то можно воспользоваться для расчета потока газа выражениями (1.42) и (1.44). Если полагать, что объем камеры достаточно велик для того, чтобы можно было пренебречь изменением концентрации кислорода в ней во времени, то изменение концентрации имеет место лишь по длине отверстия.

Из приложения 1 находим $\lambda_{O_2} = 6,35 \cdot 10^{-8} \text{ м}$; $M_{O_2} = 32 \text{ кг}$; $u_{25^\circ\text{C}} = 444,2 \text{ м/с}$.

Поскольку число Лошмидта $N_L = 2,687 \cdot 10^{19} \text{ молекул/см}^3$, а парциальное давление кислорода в воздухе составляет $2,12 \cdot 10^4 \text{ Па}$ (см. приложение 9), то концентрация кислорода в воздухе

$$N_1 = 2,687 \cdot 10^{19} \cdot \frac{2,12 \cdot 10^4}{1,02 \cdot 10^5} = 5,585 \cdot 10^{18} \text{ молекул/см}^3 = \\ = 5,585 \cdot 10^{24} \text{ молекул/м}^3.$$

Изменение концентрации кислорода по длине отверстия:

$$\frac{dN_1}{dZ} = \frac{5,585 \cdot 10^{24}}{10^{-2}} = 5,585 \cdot 10^{26} \text{ молекул/м}^4.$$

Коэффициент диффузии кислорода равен в соответствии с (1.44):

$$D = \frac{1}{3} \cdot 444,2 \cdot 6,33 \cdot 10^{-8} = 9,373 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Наконец, поток кислорода, диффундирующего извне в камеру, равен:

$$q' = 9,373 \cdot 10^{-6} \cdot 5,585 \cdot 10^{26} \cdot 10^{-4} = 5,235 \cdot 10^{16} \text{ молекул/с}.$$

Если отнести поток диффундирующего кислорода к атмосферному давлению, то объем его будет равен:

$$V' = \frac{q'}{N_A} = \frac{5,235 \cdot 10^{16}}{2,687 \cdot 10^{19}} = 1,948 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{с},$$

т. е. достаточно мал.

1.13. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ

Явление теплопроводности заключается в переносе энергии молекулами газа из одной части объема в другую.

Представим себе в газовой среде две параллельные пластины, имеющие различные температуры T_1 и T_2 , причем $T_1 > T_2$ (рис. 1.3). Расстояние между пластинами равно l . Молекулы газа, ударившиеся в более нагретую пластину, отлетают от нее с большей кинетической энергией, чем до удара.

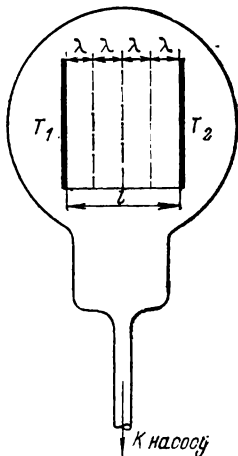


Рис. 1.3. Передача тепла через газ в условиях низкого вакуума ($\lambda \ll l$).

При достаточно высоких давлениях, когда длина свободного пути молекул λ значительно меньше расстояния между пластинами l ($\lambda \ll l$), молекулы уже на расстоянии λ от более нагретой пластины встретятся с другими молекулами, которым и отдадут часть своей энергии. Поэтому упрощенно, но принципиально верно можно представить, что газ между пластинами как бы разделен на слои шириной λ , в которых вследствие взаимных

столкновений и происходит обмен энергиями между молекулами газа. При этом от слоя к слою происходит постепенное уменьшение кинетической энергии молекул и между пластинами устанавливается постоян-

ный градиент температуры. Непосредственно в менее нагретую пластину ударяются, очевидно, не все молекулы, а лишь те, которые находятся в ближайшем к ней слое, причем температура газа в этом слое тем ближе к T_2 , чем меньше λ .

Описанное явление теплопроводности сходно с ранее рассматриваемыми явлениями вязкости и диффузии и отображается математически аналогичными уравнениями. Если воспользоваться уравнением (1.32), то можно записать, что переносимый вдоль оси Z через площадку A тепловой поток

$$Q'_\tau = K_f \frac{dE}{dZ} A, \quad (1.47)$$

где K_f — коэффициент пропорциональности;

E — внутренняя энергия газа;

$\frac{dE}{dZ}$ — градиент внутренней энергии газа вдоль оси Z .

Так как внутренняя энергия единицы массы газа, имеющего температуру T ,

$$E = C_{v_{уд}} T,$$

где $C_{v_{уд}}$ — удельная теплоемкость газа *при постоянном объеме*, т. е. когда при изменении температуры объем, занимаемый единицей массы газа, не меняется;

T — абсолютная температура газа.

Таким образом,

$$Q'_\tau = K_f \frac{d(C_{v_{уд}} T)}{dZ} A = K_f C_{v_{уд}} \frac{dT}{dZ} A = \lambda_Q \frac{dT}{dZ} A, \quad (1.48)$$

где $\lambda_Q = K_f C_{v_{уд}}$ — коэффициент теплопроводности;

dT/dZ — градиент температуры;

A — площадь поверхности.

Уравнение (1.48) называется *уравнением Фурье*; с его помощью описывается процесс теплопередачи в сплошных средах.

Рассмотрим теперь явление теплопроводности с точки зрения кинетической теории, воспользовавшись уравнением (1.34).

На долю одной молекулы приходится следующее количество энергии:

$$E = C_{вуд} T m, \quad (1.49)$$

где m — масса молекулы.

Энергия E при рассмотрении теплопроводности играет роль f в формуле (1.33). Таким образом, получим:

$$\begin{aligned} Q'_{\tau} &= \frac{1}{3} N_1 u_a \lambda \frac{dE}{dZ} A = \frac{1}{3} N_1 u_a \lambda \frac{d}{dZ} (C_{вуд} T m) A = \\ &= \frac{1}{3} N_1 u_a \lambda C_{вуд} m \frac{dT}{dZ} A. \end{aligned} \quad (1.50)$$

Сравнивая выражение (1.50) с формулой (1.47), находим, что коэффициент теплопроводности равен:

$$\lambda_Q = \frac{1}{3} N_1 u_a \lambda C_{вуд} m = \frac{1}{3} \rho u_a \lambda C_{вуд}, \quad (1.51)$$

где ρ — плотность газа.

Сравнение (1.38), (1.43) и (1.51) показывает, что

$$\lambda_Q = \eta C_{вуд} = D \rho C_{вуд}. \quad (1.52)$$

Эксперимент показывает, что вместо соотношения (1.52) надо пользоваться выражением

$$\lambda_Q = \xi \eta C_{вуд}, \quad (1.53)$$

где $\xi = 1 \div 2,5$ — поправочный множитель.

Коэффициент ξ в формуле (1.53) появляется в связи с тем, что в выводе уравнения (1.33) предполагалось, что скорости всех молекул одинаковы, и не учитывалось их фактическое распределение по скоростям. Вместе с тем явление теплопроводности связано с переносом кинетической энергии, имеющей квадратичную зависимость от скорости, т. е. зависящей от распределения скоростей гораздо в большей степени, чем вязкость. При этом очень малые отклонения в скорости существенно влияют на теплопроводность.

В выражение (1.51) входит произведение $\rho \lambda$, следовательно, теплопроводность газа от давления не зависит. Этот вывод действителен, конечно, если средняя длина свободного пути λ меньше расстояния между теплообменивающимися поверхностями.

Для плоских параллельных поверхностей уравнение (1.47) принимает вид:

$$Q'_\tau = \frac{\lambda_Q}{l} (T_1 - T_2) A, \quad (1.54)$$

где Q'_τ — тепловой поток;

λ_Q — коэффициент теплопроводности;

l — расстояние между теплообменивающимися поверхностями;

A — площадь одной из поверхностей;

T_1 и T_2 — температуры поверхностей.

Теплопроводность газовой прослойки между двумя соосными цилиндрическими поверхностями рассчитывается по уравнению

$$Q'_\tau = \frac{2\pi\lambda_Q (T_1 - T_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}} r, \quad (1.55)$$

где r — высота цилиндрической газовой прослойки; d_1 и d_2 — диаметры внутренней и внешней поверхностей.

При расстояниях l между теплообменивающимися поверхностями, соизмеримыми со средней длиной свободного пути λ или превышающими ее, теплопроводность газа уменьшается с понижением давления. Для этой области давлений правые части уравнений (1.47), (1.54) и (1.55) следует умножить на коэффициент ε . По исследованиям Ленгмюра коэффициент

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \lambda/a_{\text{ак}}K_{\text{ак}}l}, \quad (1.56)$$

где λ — средняя длина свободного пути;

l — расстояние между теплообменивающимися поверхностями;

$K_{\text{ак}}$ — коэффициент, зависящий от рода газа и равный 2,5 для одноатомных, 1,92 — для двухатомных, 1,67 — для многоатомных газов;

$\alpha_{\text{ак}}$ — коэффициент аккомодации:

$$\alpha_{\text{ак}} = \frac{T'_{\text{газ}} - T_{\text{газ}}}{T_{\text{ст}} - T_{\text{газ}}}, \quad (1.57)$$

где $T_{\text{ст}}$ — температура стенки;

$T_{\text{газ}}$ — температура газа;

$T'_{\text{газ}}$ — температура, соответствующая средней энергии молекул, отраженных от стенки.

Коэффициент аккомодации выражает собой поправку, вызванную тем, что, как показал опыт, молекулы газа, ударяясь о нагретую

лѳю или холодную поверхность пластин, как бы не успевают приобретать энергию, соответствующую температурам пластин, и отлетают с их поверхностей со скоростями, не точно соответствующими температурам. $\alpha_{ак}$ меньше единицы, и его значение зависит от рода газа, материала и состояния поверхностей пластин, с которыми взаимодействует газ, и может составлять в пределах от 0,2 до 0,95, причем для шероховатых поверхностей $\alpha_{ак}$ больше.

При $\lambda \gg l$ из (1.56) следует, что

$$\epsilon = \frac{\alpha_{ак} K_{ак} l}{\lambda}. \quad (1.58)$$

Выражение (1.54) с учетом (1.58) запишется следующим образом:

$$Q'_{\tau} = -\frac{\lambda Q_{ак} K_{ак}}{\lambda} (T_1 - T_2) A, \quad (1.59)$$

т. е. теплообмен путем теплопроводности среды между поверхностями, расстояние между которыми l меньше длины свободного пути молекул газа λ , не зависит от расстояния и обратно пропорционален длине свободного пути (прямо пропорционален давлению).

На малой теплопроводности газа при его высоком разрежении основана конструкция сосудов с двойными стенками (сосуды Дьюара), в пространстве между которыми создан высокий вакуум; благодаря очень малой теплопроводности газа в пространстве между стенками наливаемые в эти сосуды сжиженные газы, например жидкий азот, могут сохраняться длительное время.

Глава вторая

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ОТКАЧКИ

2.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрим вакуумную систему, изображенную на рис. 2.1, которая состоит из откачиваемого сосуда 1, манометрических преобразователей 2, крана 3, трубопровода 4 и насоса 5. Будем полагать, что в оболочке вакуумной системы нет течей и внутри нее нет газовой деления, а температура газа постоянна.

До начала работы насоса давление во всей вакуумной системе одинаково и газ неподвижен. С началом работы насоса начинается перемещение газа из сосуда 1 по трубопроводу 4 в насос 5, причем количество

газа в вакуумной системе непрерывно уменьшается, а так как объем системы и температура газа остаются практически неизменными, происходит понижение давления в вакуумной системе. Давление p_n на входе в насос становится ниже, чем давление p на выходе откачиваемого сосуда 1. Таким образом, создается разность давлений $p - p_n$, которая обусловлена наличием в системе трубопровода, крана и других элементов, оказывающих сопротивление прохождению потока газа. Разность $p - p_n$ принято называть движущей разностью давлений.

В связи с различием в быстроте снижения давления в откачиваемом сосуде и у входа в насос следует различать понятия о быстроте откачки сосуда и быстроте откачивающего действия насоса.

Быстротой откачки сосуда или эффективной быстротой откачки S_0 называется объем газа, поступающий в единицу времени из сосуда в трубопровод при данном давлении p в откачиваемом сосуде.

Так как S_0 с изменением давления, вообще говоря, изменяется, то ее значение приходится относить к определенному моменту времени; в следующий момент в связи с изменением давления в сосуде быстрота его откачки может принять другое значение. Поэтому для определения быстроты откачки сосуда надо брать бесконечно малый промежуток времени dt , в течение которого из откачиваемого сосуда в трубопровод входит бесконечно малый объем газа dV (рис. 2.1).

По определению

$$S_0 = \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

при данном давлении p в сосуде.

Быстротой откачивающего действия или, короче, быстротой действия вакуумного насоса S_n при данном входном давлении p_n называется объем газа, поступающий в работающий насос в единицу времени при этом давлении.

Так как быстрота действия насоса с изменением давления также изменяется, то для ее выражения надо

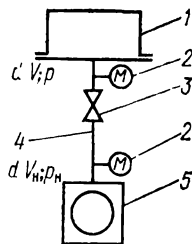


Рис. 2.1. Простейшая вакуумная система.

брать бесконечно малый промежуток времени dt , в течение которого в насос поступает бесконечно малый объем газа dV_n , измеряемый при впускном давлении p_n (рис. 2.1).

По определению

$$S_n = \frac{dV_n}{dt} \quad (2.2)$$

при впускном давлении p_n .

По аналогии с S_o и S_n можно говорить, что быстрота действия вакуумной системы в любом сечении трубопровода $S_i = dV_i/dt$ при давлении p_i , причем dV_i — объем газа, проходящий через сечение трубопровода за промежуток времени dt и измеряемый при том же давлении p_i .

Поскольку в вакуумной системе отсутствуют натекания и газовыделение, то количество газа Q'_i , протекающего в единицу времени в любом сечении трубопровода может быть определено как произведение давления p_i в этом сечении на объем газа S_i , проходящего через него в единицу времени:

$$Q'_i = p_i S_i. \quad (2.3)$$

Это количество газа принято называть *потокм газа* в данном сечении трубопровода. Обычно поток газа измеряется в следующих единицах:

$$pV/t = \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с} = \text{Вт}.$$

Поток газа, протекающий во входном сечении вакуумного насоса, Q'_n называется *производительностью насоса при данном впускном давлении p_n* .

Так как во всех сечениях трубопровода, соединяющего откачиваемый сосуд с насосом, поток газа Q'_i одинаков, то можно записать:

$$Q'_i = Q'_n = p_n S_n = p S_o, \quad (2.4)$$

где S_o — быстрота откачки сосуда.

В целях получения более наглядного представления о процессах, происходящих во время откачки, проводят аналогию между вакуумной системой и электрической цепью. При этом разность давлений $p - p_n$ уподобляется разности потенциалов, поток Q' силе тока, а частное от деления разности давлений на поток называется со-

противлением трубопровода W . При расчетах вакуумных систем чаще пользуются величиной

$$U = \frac{1}{W} = \frac{Q'}{p - p_d}, \quad (2.5)$$

называемой *проводимостью* трубопровода; измеряется U обычно в м³/с или л/с.

2.2. СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПРОВОДИМОСТЬ СЛОЖНОГО ВАКУУМНОГО ТРУБОПРОВОДА

Как правило, вакуумные системы включают в себя затворы, ловушки, краны и трубопроводы с различными по длине поперечными сечениями. В то же время известные аналитические выражения позволяют рассчитывать проводимости лишь для отрезков трубопроводов с постоянным или плавно меняющимся поперечным сечением.

Проводимость сложных трубопроводов рассчитывается следующим образом:

а) если участки трубопровода с различными поперечными сечениями и длинами соединены *последовательно*, то рассчитываются порознь значения проводимостей отдельных участков, а общая проводимость сложного трубопровода или его сопротивление определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{U_{\text{послед}}} &= \sum \frac{1}{U_i} \\ \text{или} \quad W_{\text{послед}} &= \sum W_i, \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

где $U_{\text{послед}}$ и $W_{\text{послед}}$ — результирующие проводимость и сопротивление трубопровода, состоящего из нескольких последовательно соединенных участков;

б) если участки трубопровода с различными поперечными сечениями и длинами соединены *параллельно*, то отдельные участки также рассчитываются порознь, а общая проводимость сложного трубопровода или его сопротивление определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{парал}} &= \sum U_i \\ \text{или} \quad \frac{1}{W_{\text{парал}}} &= \sum \frac{1}{W_i}, \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

где $U_{\text{парал}}$ и $W_{\text{парал}}$ — результирующая проводимость и сопротивление сложного трубопровода, состоящего из нескольких параллельных участков; U_i и W_i — проводимости и сопротивления отдельных участков трубопровода.

2.3. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Из формул (2.4) и (2.5) можно получить уравнение, связывающее быстроту откачки сосуда S_0 с быстротой действия насоса S_n и проводимостью трубопровода U . Это уравнение можно вывести следующим образом.

Представим уравнения (2.4) и (2.5) в виде

$$Q' = pS_0; \quad Q' = p_n S_n; \quad Q' = U(p - p_n).$$

Теперь выразим давления p и p_n через Q' , S_0 и S_n и подставим в последнее уравнение:

$$Q' = U \left(\frac{Q'}{S_0} - \frac{Q'}{S_n} \right),$$

откуда получим:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}, \quad (2.8)$$

или

$$S_0 = \frac{S_n U}{S_n + U}. \quad (2.9)$$

Поскольку уравнением (2.8) или (2.9) связываются основные параметры вакуумной системы: быстрота откачки сосуда, быстрота действия насоса и проводимость трубопровода, это уравнение называется *основным уравнением вакуумной техники*.

Анализ уравнений (2.8) и (2.9) показывает, что, если проводимость трубопровода системы значительно больше быстроты действия насоса, то быстрота откачки сосуда зависит только от насоса, и, наоборот, если проводимость трубопровода гораздо меньше быстроты действия насоса, то быстрота откачки сосуда приблизительно равна проводимости трубопровода и мало зависит от быстроты действия насоса.

2.4. ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ

Процесс изменения состояния газа в вакуумной системе можно считать *изотермическим* ($T = \text{const}$), если количество газа в ней мало, т. е. при достаточно низких

давлениях (практически меньших 10 Па) и газ успевает нагреваться стенками оболочки вакуумной системы, сохраняя свою температуру практически постоянной (примерно равной температуре стенок оболочки вакуумной системы).

Как мы знаем, для изотермического процесса справедлив закон Бойля — Мариотта (§ 1.3).

При высоких давлениях в вакуумной системе расширение газа может происходить столь быстро, что теплообмен со стенками не влияет на температуру газа. *Процесс изменения состояния газа, при котором передачей тепла газу от окружающих стенок можно пренебречь, называется адиабатическим.*

Адиабатический процесс описывается уравнением

$$pV^{\kappa} = \text{const}, \quad (2.10)$$

где $\kappa = C_{p, \text{уд}} / C_{v, \text{уд}}$ — показатель адиабаты;

$C_{p, \text{уд}}$, $C_{v, \text{уд}}$ — удельные теплоемкости газа соответственно при постоянном давлении и при постоянном объеме.

Для двухатомных газов $\kappa = 1,4$.

Температура, давление и плотность газа при адиабатическом расширении связаны следующим соотношением:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (2.11)$$

где T_0 , ρ_0 , p_0 — начальные температура, плотность и давление газа.

Как нетрудно видеть, уравнения (1.6) и (2.10) относятся соответственно к двум крайним по своему характеру процессам изменения состояния газа: первое — к *изотермическому* процессу, когда температура газа полностью задается постоянной температурой стенок сосуда, содержащего газ; второе — к *адиабатическому* процессу, когда температура газа понижается практически без теплообмена со стенками.

При практической работе приходится иметь дело с *промежуточным* процессом, когда между газом и стенками имеется неполный теплообмен. В этом случае соотношение между давлением и удельным объемом газа описывается уравнением

$$pV^n = \text{const}, \quad (2.12)$$

в котором показатель степени n имеет промежуточное значение, т. е. $1 < n < \infty$.

Процесс изменения состояния газа, описываемый уравнением (2.12), называется *политропным*, а n — показателем политропы.

Графики в системе прямоугольных координат (p, V), изображающие изотермический, адиабатический и политропный процессы, называются соответственно *изотермой*, *адиабатой* и *политропой*.

2.5. КРИТЕРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ТРУБОПРОВОДАХ

Во время откачки вакуумной системы давление газа обычно уменьшается, и одновременно с этим меняются режимы течения газа в трубопроводах.

В самом начале процесса откачки при сравнительно высоких давлениях и значительных скоростях газа наблюдается *турбулентный режим течения*, характеризующийся хаотическим нерегулярным движением взаимодействующих между собой масс, при этом давление в каждой точке вакуумной системы носит пульсирующий характер.

При постепенном уменьшении давления скорости течения газа также уменьшаются, характер потока меняется, образуются параллельно перемещающиеся слои газа. Скорости перемещения этих слоев постепенно возрастают от нуля до максимума в направлении от стенки трубопровода к его оси. Этот вид течения называется *ламинарным* или *вязкостным*.

Переход от турбулентного течения к ламинарному обуславливается достижением критического значения некоторого безразмерного параметра — *числа Рейнольдса* Re , которое рассчитывается по формуле

$$Re = \frac{u_{\text{газ}} d \rho}{\eta} \quad (2.13)$$

где $u_{\text{газ}} = Q'/A$ — средняя скорость газа;

d — диаметр трубопровода;

p — давление газа;

ρ — плотность газа;

η — коэффициент динамической вязкости;

Q' — поток газа;

A — площадь поперечного сечения трубопровода.

При вычислениях удобнее пользоваться формулой для расчета числа Рейнольдса, выраженной через поток газа Q' :

$$Re = \frac{4m}{\pi k T \eta} \frac{Q'}{d}, \quad (2.14)$$

где k — постоянная Больцмана;

m — масса молекулы, кг;

T — температура, К;

η — коэффициент динамической вязкости, Па·с;

Q' — поток газа, протекающего через трубопровод, м³·Па/с;

d — диаметр трубопровода, м.

Критическим значением числа Рейнольдса, выше которого может существовать только турбулентный режим, принято считать

$$Re = 2200. \quad (2.15)$$

В процессе откачки вакуумной системы давление уменьшается настолько, что средняя длина свободного пути молекул λ становится соизмеримой с диаметром трубопровода d и даже начинает превышать его. При этом молекулы газа почти не сталкиваются между собой и взаимодействуют только со стенками трубопровода. Такой режим течения газа называется *молекулярным*.

Обычно полагают, что режим течения газа в трубопроводе будет молекулярным, если

$$\frac{\lambda}{d} \geq \frac{1}{3}, \quad (2.16)$$

где λ — средняя длина свободного пути молекул газа;

d — диаметр трубопровода.

С учетом выражения (1.27) можно записать, что режим течения для воздуха при 298 К будет *молекулярным*, если

$$\bar{p}d \leq 0,02 \text{ Па} \cdot \text{м}, \quad (2.17)$$

где $\bar{p} = (p_1 + p_2) / 2$ — среднее по длине трубопровода давление;

p_1 и p_2 — давления на концах трубопровода.

Режим течения газа в трубопроводе будет *ламинарным* или *вязкостным*, если

$$\frac{\lambda}{d} \leq 5 \cdot 10^{-3}. \quad (2.18)$$

Для воздуха при 298 К режим течения будет ламинарным или вязкостным, если

$$\bar{p}d \geq 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м}. \quad (2.19)$$

Режим течения газа в трубопроводе будет *промежуточным* или *молекулярно-вязкостным*, если

$$0,02 > \bar{p}d > 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м}. \quad (2.20)$$

Часто пользуются понятием о степени вакуума, которая характеризуется приближенно абсолютными значениями давления.

Обычно полагают, что область давлений больше 100 Па относится к *низкому вакууму*, интервал от 100 до 10^{-1} Па соответствует *среднему вакууму* и интервал от 10^{-1} до 10^{-5} Па — *высокому вакууму* и, наконец, давление меньше 10^{-5} Па соответствует *сверхвысокому вакууму*.

Отметим, что эти области давлений различаются лишь степенью трудности и способом получения, но не строго связаны со свойствами и поведением газов в вакуумных системах.

2.6. РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОТКАЧКИ ПРИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ ТЕЧЕНИИ ГАЗА И ПОСТОЯННЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИИ И НАТЕКАНИИ

Стационарным течением газа называется такое, когда давление и поток неизменны во времени, а режим течения газа одинаков по всей длине трубопровода. Однако при откачке реальных вакуумных систем довольно часто упомянутые условия существования стационарного течения не соблюдаются.

Расчет длительности откачки для реальных условий математически труден. Поэтому для упрощения расчетов определяют длительность откачки для так называемого *квазистационарного течения* газа. *Квазистационарным течением газа называют такое, при котором разность давлений на концах трубопровода мала по сравнению со средним давлением в нем, объем трубопровода значительно меньше объема откачиваемого сосуда; в трубопроводе в каждый момент времени существует только один режим течения газа.*

Для определения длительности откачки будем считать, что процесс откачки из сосуда 1 (см. рис. 2.1) происходит так медленно, что температура газа в сосу-

де постоянна и равна температуре T стенок сосуда. Тогда за время dt из сосуда I объемом V удаляется количество газа, равное $S_0 p dt$, где p — меняющееся в процессе откачки давление газа в сосуде I ; S_0 — эффективная быстрота откачки.

За этот же промежуток времени в объем сосуда I поступает с постоянной скоростью количество газа, равное

$$Q'_{\Sigma} dt,$$

где Q'_{Σ} — суммарный поток газа, поступающий в сосуд I за счет натекания и газовыделения.

Изменение количества газа в сосуде I за время dt составит:

$$V dp,$$

где V — объем сосуда.

Уравнение материального баланса, таким образом, имеет вид:

$$V dp = Q'_{\Sigma} dt - S_0 p dt. \quad (2.21)$$

После разделения переменных получим:

$$dt = \frac{dp}{Q'_{\Sigma}/V - S_0 p/V}, \quad (2.22)$$

откуда в предположении, что Q'_{Σ} и S_0 при откачке не меняются, получим

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_{\text{нач}} - Q'_{\Sigma}/S_0}{p - Q'_{\Sigma}/S_0}, \quad (2.23)$$

где $p_{\text{нач}}$ — давление в сосуде I перед началом откачки.

При очень быстрой откачке изменение состояния газа в сосуде *политропическое*, и поэтому, как показывают расчеты,

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_{\text{нач}}^{1/n} - Q'_{\Sigma}/S_0 p_{\text{нач}}^{(n-1)/n}}{p^{1/n} - Q'_{\Sigma}/S_0 p_{\text{нач}}^{(n-1)/n}}, \quad (2.24)$$

где n — показатель политропы.

Из формулы (2.23) следует, что при длительной откачке, т. е. при $t \rightarrow \infty$, имеем:

$$p_{\text{ост}} = Q'_{\Sigma}/S_0, \quad (2.25)$$

где $p_{\text{ост}}$ — наименьшее давление, которое может быть достигнуто в системе (предельное остаточное давление).

По формулам (2.23) и (2.24) рассчитывается длительность откачки при турбулентном и вязкостном режимах, когда S_0 практически полностью определяется быстротой действия насоса S_n , которая, например, для механических вакуумных насосов в достаточно широком диапазоне давлений остается постоянной, а Q'_z может быть принята постоянной или равной нулю.

В тех случаях, когда Q'_z или S_0 меняются в процессе откачки, весь период откачки разбивают на отдельные участки по давлению, внутри каждого из которых газовыделение, натекание, характер процесса расширения газа и эффективную быстроту откачки можно условно принимать *постоянными*. При этом общее время откачки

$$t = \sum_{i=1}^{i=k} t_i,$$

где k — число участков, на которое разбит период откачки;

t_i — длительность откачки на i -м участке, рассчитываемая по формулам (2.23) или (2.24).

Давление в откачиваемом сосуде в каждый данный момент времени определяется равновесием между удаляемым с помощью вакуумного насоса потоком газа и потоком, поступающим в откачиваемый сосуд. Последний суммируется из потока газов $Q'_{\text{изд}}$, поступающих из обрабатываемых изделий, газовыделения со стенок вакуумной системы $Q'_{\text{газ}}$, обращенных в вакуумную полость, и потока газов $Q'_{\text{нат}}$, натекающих в систему из атмосферы. Таким образом, суммарный газовый поток Q'_z равен:

$$Q'_z = Q'_{\text{изд}} + Q'_{\text{газ}} + Q'_{\text{нат}} = p_n S_n = p S_0, \quad (2.26)$$

где p_n — давление во входном сечении насоса;

S_n — быстрота действия насоса при давлении p_n ;

p — давление в откачиваемом сосуде;

S_0 — эффективная быстрота откачки сосуда при давлении p .

$Q'_{\text{изд}}$ и $Q'_{\text{газ}}$ определяются как результат выделения газов, содержащихся в материале изделий и сорбиро-

ванных на поверхностях, обращенных в вакуумную полость.

При расчетах, производящихся во время эскизного проектирования вакуумной системы и имеющих своей целью выбор типоразмера насоса, принимают *газовыделение постоянным*.

Поток газов $Q'_{\text{изд}}$, поступающих в вакуумную систему из обрабатываемых изделий, можно оценить по формуле

$$Q'_{\text{изд}} = \frac{G q_{\text{газ}}}{t} \Omega, \quad (2.27)$$

где G — масса обрабатываемых изделий, кг;

$q_{\text{газ}}$ — удельное газовыделение из материала обрабатываемых изделий, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{кг}$;

Ω — коэффициент, учитывающий неравномерность процесса газовыделения, обычно $\Omega = 1,5 \div 3$;

t — длительность процесса вакуумной обработки, с.

Значения $q_{\text{газ}}$ удельного газовыделения для некоторых материалов при различных температурах приводятся в приложении 8.

Поток газов $Q'_{\text{газ}}$, выделяющихся со стенок вакуумной системы, обращенных в вакуумную полость, определяется по формуле

$$Q'_{\text{газ}} = q'_{\text{газ}} A, \quad (2.28)$$

где $q'_{\text{газ}}$ — скорость удельного газовыделения с поверхностей стенки вакуумной системы (см. приложение 7);

A — поверхность, обращенная в вакуумную полость.

В случае, если вакуумный сосуд ограничивается стенками, изготовленными из разных материалов, газовыделение должно суммироваться из газовыделений всех элементов, ограничивающих вакуумную систему:

$$Q'_{\text{газ}} = \sum_{i=1}^{i=n} q'_{\text{газ}i} A_i, \quad (2.29)$$

где $q'_{\text{газ}i}$ — скорость удельного газовыделения с поверхности i -го элемента стенки вакуумной системы (см. приложение 7);

A_i — поверхность стенки, обращенной в вакуумную полость, i -го элемента вакуумной системы.

При проектном расчете газовыделение $Q'_{\text{газ}}$ с поверхностей, имеющих комнатную температуру, принимают постоянным во времени. Для определения $Q'_{\text{газ}}$ из материалов используют значения скорости удельного газовыделения $q'_{\text{газ}}$ после 1 ч откачки (см. приложение 7 и рис. 17-1 — 17-3).

Поток газов $Q'_{\text{нат}}$, натекающих в вакуумную систему, обычно берется по характеристикам элементов вакуумной системы, а в случае их отсутствия — равным или несколько большим произведения чувствительности течеискателя (см. приложение 11) на число мест, которые могут стать источниками натекания.

Для каждого отрезка времени давление в сосуде может быть найдено по формуле

$$p = \frac{Q'_{\text{изд}} + Q'_{\text{газ}} + Q'_{\text{нат}}}{S_0}. \quad (2.30)$$

Рассмотренная выше методика расчета вакуумной системы предполагает, что суммарный газовый поток Q'_Σ меняется в относительно небольших пределах ($\Omega = 1,5 + 3$). Такой характер изменения Q'_Σ можно обеспечить постепенным повышением температуры материала, при которой осуществляется технологический процесс. Контролируемой величиной обычно при этом является давление в сосуде, которое стремятся поддерживать не выше уровня, определяемого условиями проведения технологического процесса.

Когда откачивается сосуд со значительной площадью поверхности стенок или технологический процесс ведется при постоянной температуре, пренебречь изменением во времени суммарного газового потока нельзя. Методика расчета длительности откачки с учетом изменения скорости суммарного газового потока рассматривается в следующем параграфе.

2.7. РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОТКАЧКИ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

Как уже отмечалось, применение уравнений (2.23), (2.24) возможно лишь в тех случаях, когда предполагают, что суммарный газовый поток в вакуумной системе есть величина постоянная, мало меняющаяся во времени или весьма малая по сравнению с потоком газа,

удаляемого из вакуумного сосуда. Иными словами, $Q'_z = \text{const}$ или $Q' = 0$.

Однако в ряде случаев, например при откачке вакуумной системы, у которой рабочее давление близко к предельному остаточному давлению насоса, так считать нельзя; необходимо учитывать изменение во времени потока газов, выделяющихся в вакуумной системе.

Во время откачки сосуда, имеющего комнатную температуру, удаление газов, связанных с его стенками, идет сравнительно медленно. При этом в основном удаляются физически адсорбированные газы.

На основании эксперимента получены графики скоростей удельного газовыделения $q'_{\text{газ}}$ с поверхности при комнатной температуре (293 К) в зависимости от времени откачки для ряда материалов при различной их предварительной обработке (рис. 17.1—17.3 и приложение 7). В большинстве случаев изменение скорости удельного газовыделения $q'_{\text{газ}}$ от времени при комнатной температуре подчиняется экспоненциальному закону:

$$q'_{\text{газ}} = q'_{\text{газ}} e^{-ht}, \quad (2.31)$$

где $q'_{\text{газ}}$ — начальная скорость удельного газовыделения ($t=0$), $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

h — константа, зависящая от рода материала, предварительной его обработки, с^{-1} ;

t — длительность откачки, с.

При расчетах удобнее пользоваться формулой, полученной после логарифмирования:

$$\lg q'_{\text{газ}} = A_{\text{дес}} - B_{\text{дес}} t, \quad (2.32)$$

где $A_{\text{дес}}$ и $B_{\text{дес}}$ — константы (см. приложение 7).

Так как графики скорости удельного газовыделения с поверхности, построенные в полулогарифмическом масштабе, имеют вид прямых линий, представляется возможным производить экстраполяцию графиков в сторону больших времен откачки.

Суммарный газовый поток со стенок для каждого интервала времени откачки может быть найден по формуле (2.29).

Время, необходимое для достижения заданного давления, проще всего найти графически. Для этого надо значения ординат на кривых скоростей удельного газовыделения (рис. 17.1, 17.2 или 17.3) умножить на пло-

щадь поверхности, обращенную в вакуумную полость, и построить график $Q'_z = f(t)$. Затем через точку на оси ординат, соответствующую потоку газов, удаляемых вакуумной системой при заданном давлении [см. формулу (2.4)], нужно провести горизонтальную прямую до пересечения с кривой скорости газовыделения. Абсцисса точки пересечения даст время достижения заданного давления (см. рис. 20.3). Если стенки вакуумной системы изготовлены из разных материалов, необходимо построить кривые газовыделения для всех элементов и, просуммировав их ординаты для соответствующих моментов времени, получить кривую скорости общего газовыделения. Время, необходимое для достижения заданного давления, находится так же, как и в предыдущем случае.

Пользуясь кривыми скоростей удельного газовыделения, можно решить и задачу выбора эффективной быстроты откачки вакуумной системы S_0 , исходя из заданного времени достижения определенного давления.

При расчете ряда технологических установок, например вакуумного отжига, необходимо определить поток газов из материалов *при повышенных температурах*.

При подъеме температуры поток газов сначала быстро растет, затем несколько уменьшается и по мере дальнейшего увеличения температуры вновь начинает возрастать. Первый максимум потока газов для большинства материалов находится при температуре примерно 723—773 К. Отметим, что это обстоятельство используется в целях улучшения качества обезгаживания деталей электровакуумных приборов (ЭВП) применением *режима ступенчатого вакуумного отжига*, заключающегося в том, что в указанном выше интервале температур дается выдержка и лишь затем следует дальнейший подъем температуры. Вторая выдержка производится обычно при температуре на 200—500 К ниже температуры плавления соответствующего материала, если отсутствуют какие-либо другие ограничения (изменение кристаллической структуры, недопустимая деформация из-за потери прочности или в результате фазовых переходов, высокое давление паров материала и т. п.). Количество газов, выделяющихся с поверхности на первой ступени отжига, относительно невелико и соответствует одному или нескольким молекулярным слоям газа на поверхности материала.

В дальнейшем процесс газовой выделения связан с *диффузией газа из толщ обезгаживаемого материала*. Если известны коэффициент диффузии и начальная концентрация газов в материале, определение потока газов не составляет труда.

Таким образом, подсчет длительности откачки вакуумной системы до заданного давления *при переменном потоке газов* производится в следующей последовательности.

1. Подсчитывают поток из обезгаживаемых материалов по разным газам для каждого интервала времени, на которые предварительно разбивается период откачки.

2. Суммируя потоки по всем газам из обезгаживаемого материала, для каждого интервала времени, строят график $Q' = f(t)$.

3. По методике, изложенной в § 2.7, определяют суммарный поток газов с холодных элементов вакуумной системы и также строят график $Q' = f(t)$.

4. Наконец, используя уравнение (2.26), строят график изменения суммарного потока газов $Q'_\Sigma = f(t)$.

5. По графику $Q'_\Sigma = f(t)$ определяют время достижения заданного давления, либо давление, достигаемое за данное время.

Задача 2.1. До какого давления необходимо откачать воздух из баллона для алюминирования его поверхности, если распыляемый алюминий расположен на расстоянии 50 мм от наиболее удаленной точки поверхности баллона?

Ответ: $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па.

Задача 2.2. Расстояние между нагретой и холодной поверхностями 10 мм, давление воздуха 10^5 Па. Как изменится коэффициент теплопроводности воздуха, если давление снизится до $5 \cdot 10^4$ Па.

Ответ: не изменится.

Задача 2.3. Как изменится коэффициент теплопроводности газа между поверхностями, указанными в предыдущей задаче, если давление газа повысится от $1,333 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^{-2}$ Па.

Ответ: повысится в 3 раза.

Глава третья

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЗОВ С ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

3.1. О ПОГЛОЩЕНИИ И ВЫДЕЛЕНИИ ГАЗОВ ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

При соприкосновении газа с твердым телом всегда происходят одновременно два противоположных явления: 1) поглощение газа твердым телом (*сорбция*);

2) выделение газа из твердого тела (*десорбция*). В зависимости от температуры, количества газа, содержащегося в твердом теле, и давления газа, окружающего твердое тело, одно явление может временно преобладать над другим, но если температуру поддерживать постоянной, то обязательно наступит динамическое равновесие, при котором количества газа, поглощаемого и выделяемого твердым телом в единицу времени, становятся равными, а содержание газа в твердом теле и давление окружающего газа становятся постоянными.

Таким образом, если мы сумеем создать условия, благоприятствующие сорбции, то равновесие наступит при более низком давлении окружающего газа, используя вещества с большой сорбционной способностью, можно существенно улучшить вакуум в вакуумном приборе или сосуде.

Облегчая десорбцию, мы можем, как говорят, обезгазить твердое тело, т. е. довести содержание газа в нем до возможного минимума и тем самым устранить опасность газовыделения из материалов и деталей в вакуумном объеме или в готовых вакуумных приборах.

Отсюда нетрудно видеть, что изучение явлений, происходящих при соприкосновении газов с твердыми телами, имеет для вакуумной техники первостепенное значение.

Изучение процессов взаимодействия газов с твердыми телами приводит к выводу, что следует различать два основных вида сорбции: *адсорбцию*, т. е. поглощение газа, путем удержания его на поверхности твердого тела; *абсорбцию*, т. е. поглощение газа внутри твердого тела.

В связи с этим вещество, адсорбирующее или абсорбирующее газ, для краткости можно называть соответственно *адсорбентом* или *абсорбентом*.

В свою очередь адсорбция может быть двух видов: физической и химической (или, короче, хемосорбцией).

При физической адсорбции энергия связи молекул газа с поверхностью большинства материалов сравнительно невелика; подобно конденсации пара физическая адсорбция происходит с выделением тепла (экзотермический процесс) и, следовательно, протекает очень быстро.

Хемосорбция характеризуется более прочной связью между адсорбентом и молекулами газа, а сам процесс

хемосорбции подобен образованию химического соединения; процесс в отличие от физической адсорбции бывает необратим. Хемосорбция происходит с поглощением тепла (эндотермический процесс), поэтому для хемосорбции требуется сообщение молекулам газа дополнительной энергии (энергии активации).

Заметим, что оба процесса протекают одновременно, так как при практической работе приходится, как правило, иметь дело со смесями различных газов и с твердыми материалами, имеющими различные сорбционные свойства. При этом адсорбция — это первый и необходимый шаг для проникновения газа внутрь твердого тела.

Абсорбция также подразделяется на два вида: образование твердого раствора и химическая реакция.

Процесс образования твердого раствора заключается в том, что адсорбированные атомы газа, обладающие достаточной энергией, проникают с поверхности внутрь кристаллической решетки твердого тела, занимая в ней свободные места.

Химическая реакция газа с твердым телом приводит к образованию нового химического соединения как на поверхности, так и внутри абсорбента.

Явления, связанные с взаимодействием газов с твердыми телами, чрезвычайно сложны и еще не вполне изучены; поэтому в следующих параграфах кратко даются лишь необходимые сведения о них.

3.2. АДСОРБЦИЯ И ДЕСОРБЦИЯ ГАЗОВ

Физическая адсорбция

Чтобы получить представление о силах, удерживающих молекулы газа на поверхности твердого тела, вспомним, что атом любого вещества имеет положительные электрические заряды в ядре и отрицательные заряды в виде электронной оболочки, причем количества положительных и отрицательных зарядов одинаковы и в целом атом нейтрален.

Также нейтральны и молекулы, образующиеся в результате соединения отдельных атомов.

Однако в зависимости от того, совпадают ли центры разноименных электрических зарядов или они смещены друг относительно друга, молекулы могут быть соответственно *неполярными* или *полярными*. В последнем

случае каждая молекула представляет собой *электрический диполь*.

В качестве примера газообразных веществ, состоящих из неполярных молекул, можно привести H_2 , O_2 , N_2 и т. п. Их молекулы представляют соединение двух одинаковых атомов; неполярны также атомы инертных газов (He , Ne , Ar , Kr , Xe).

Примером газообразных веществ, имеющих полярные молекулы, могут служить H_2O , CO и др.; их молекулы состоят из разнородных атомов.

Твердые вещества отличаются друг от друга *структурой кристаллической решетки*.

Так, существуют твердые тела с *ионной кристаллической решеткой*, в узлах которой находятся чередующиеся

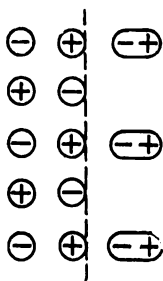


Рис. 3.1. Схема адсорбции полярных молекул твердым телом с ионной кристаллической решеткой.

положительные и отрицательные ионы. Например, такие вещества, как BaO , SrO , CaO , имеют ионную кристаллическую решетку, в узлах которой чередуются положительные ионы металла (Ba^+ , Sr^+ , Ca^+) с отрицательными ионами кислорода (O^-).

Существуют *молекулярные и атомные кристаллические решетки*, в узлах которых расположены нейтральные молекулы или атомы. Примером твердого вещества с нейтральными частицами в узлах кристаллической решетки могут служить вещества, кристаллическая

решетка которых состоит из нейтральных атомов углерода (алмаз, графит).

Наконец, существуют кристаллические решетки, состоящие только из положительных ионов, между которыми находятся связывающие их свободные электроны (электронный газ). Такими кристаллическими решетками обладают металлы, поэтому они названы *металлическими*.

На рис. 3.1 схематически показано, как можно представить себе взаимодействие между полярными молекулами газа и твердым адсорбентом, имеющим ионную кристаллическую решетку. Молекулы газа изображены в виде диполей, кружки с чередующимися знаками изображают находящиеся на поверхности адсорбента раз-

ноименные ионы кристаллической решетки. Под действием электрического поля, создаваемого поверхностными ионами адсорбента, полярные молекулы газа, приблизившиеся к узлам кристаллической решетки, ориентируются соответствующим образом и остаются связанными поверхностным полем твердого тела. При этом молекулы газа занимают положения, в которых силы притяжения уравновешиваются силами отталкивания, возникающими, как мы знаем из § 1.6, при слишком большом сближении молекул (атомов).

Если к ионной кристаллической решетке приблизится на атомное расстояние неполярная молекула, картина взаимодействия принципиально не меняется, так как неполярные молекулы поляризуются и становятся диполями; разница может быть лишь в прочности адсорбционной связи.

После сказанного нетрудно представить себе взаимодействие между металлической решеткой и приблизившимися к ней полярными или неполярными молекулами окружающего газа.

Наконец, в случае, если и кристаллическая решетка адсорбента, и окружающий газ состоят из неполярных молекул (атомов), картина взаимодействия между молекулами адсорбента и газа принципиально остается той же. Взаимодействие может быть слабее, но оно все же возникает вследствие мгновенных смещений (колебаний) центров зарядов обоих знаков, постоянно происходящих в молекулах и приводящих к образованию временных (мгновенных) диполей.

Обобщая только что сказанное, можно заключить, что *физическая адсорбция газа твердым телом происходит в результате взаимодействия между молекулами (атомами) газа и активными адсорбционными центрами, создаваемыми поверхностным полем твердого тела.* Силы этого взаимодействия можно отождествить с теми силами, которыми обусловлена соответствующая поправка a/V^2 в уравнении Ван-дер-Ваальса (1.17). В связи с этим физическую адсорбцию иногда называют *ван-дер-ваальсовской адсорбцией*.

Так как чем больше поверхность адсорбента, тем больше на ней активных центров, то можно сделать практический вывод: *твердое тело обладает тем большей адсорбционной способностью, чем больше его удель-*

ная поверхность, т. е. поверхность, приходящаяся на единицу массы ($\text{м}^2/\text{кг}$).

Практическая работа по применению различных адсорбентов подтверждает этот вывод: наиболее высокой адсорбционной способностью обладают твердые тела с развитой поверхностью (шероховатые, в виде порошка и в особенности с большим количеством узких пор: пористые тела могут иметь удельную поверхность до $10^6 \text{ м}^2/\text{кг}$).

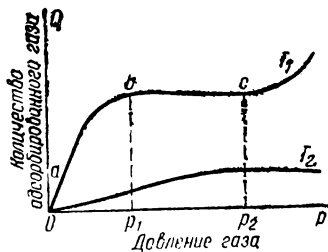


Рис. 3.2. Зависимость количества адсорбированного газа от его давления при постоянной температуре (изотермы адсорбции).

Далее необходимо представлять себе, что адсорбированные молекулы газа остаются связанными на поверхности твердого тела в течение очень короткого промежутка времени. Участвуя в тепловом (колебательном) движении частиц твердого тела, при достаточно большой амплитуде адсорбированные молекулы испаряются с поверхности, но на их месте адсорбируются новые, так что состав адсорбированного слоя постоянно меняется.

Отсюда вытекает новый практический вывод: чтобы равновесное состояние соответствовало возможно большему количеству адсорбированного газа, необходимо понижать температуру адсорбента, и, наоборот, для удаления адсорбированного слоя мы должны повышать температуру адсорбента.

Следует отметить, что при повышении температуры адсорбированный газ покидает поверхность адсорбента, не изменяя своего состава, что говорит о *полной обратимости процесса физической адсорбции*.

Рассмотрим, как происходит адсорбция в зависимости от плотности или давления газа, окружающего твердое тело. В качестве примера рассмотрим кривые рис. 3.2, показывающие зависимость количества адсорбированного твердым телом газа от давления при постоянной температуре, так называемые *изотермы адсорбции*. Участок ab верхней изотермы соответствует низким давлениям, когда еще не все активные центры на поверхности твердого тела заняты адсорбированными мо-

лекулами газа. На этом участке количество адсорбированного газа растет примерно пропорционально давлению. Качественное отличие наблюдается при покрытиях поверхности твердого тела газом в количествах соответственно менее и более одного мономолекулярного слоя. Если все вакантные места заняты молекулами газа, то говорят, что заполнение поверхности твердого тела равно одному *монослою*. Заполнение поверхности адсорбированным газом можно характеризовать коэффициентом

$$\theta = N_{\text{пов}} / N_{\text{ипов}}, \quad (3.1)$$

где $N_{\text{пов}}$ — количество молекул, адсорбированных на единице поверхности твердого тела;

$N_{\text{ипов}}$ — число мест на единице поверхности, которые могут быть заняты адсорбированными молекулами (число молекул в заполненном мономолекулярном слое).

Обычно считают, что молекулы газа покрывают поверхность твердого тела с шагом, равным их диаметру. При этом значение $N_{\text{ипов}}$ находится в пределах $(0,4-2,5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$.

Воспользовавшись ответами задач 1.10 и 1.11, можно подсчитать время образования монослоя адсорбированных молекул на единице поверхности твердого тела.

Оказывается, что при давлении 100 Па образование монослоя происходит за время $30 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, а при давлении 10^{-5} Па для этого потребуется уже 30 с, а при 10^{-9} Па — 90 ч!

Этот подсчет показывает необходимость высокого вакуума при изучении свойств поверхности твердого тела и получении чистых тонких пленок.

Интересно отметить, что десорбция только одного монослоя молекул газа с поверхности твердого тела приводит к резкому повышению давления в сосуде, предварительно откачанном до высокого вакуума. Если воспользоваться формулой (1.25) и подсчитать давление газа в 1 см^3 объема, которое будет при десорбции монослоя газа с 1 см^2 поверхности, то окажется, что это давление при температуре 273 К будет равно примерно 4 Па, что относится к области среднего вакуума.

Если известна природа системы «газ — адсорбент», то долю θ поверхности адсорбента, занятую (на участке ab) адсорбированными молекулами газа, можно подсчитать по формуле Ленгмюра:

$$\theta = \frac{b_0 p}{1 + b_0 p}, \quad (3.2)$$

где b_0 — константа, характерная для данной системы.

При достаточно низких давлениях $b_0 p$ гораздо меньше единицы и, следовательно, $\theta = b_0 p$, т. е. для поверхности твердого тела, занятая адсорбированным газом, пропорциональна давлению.

Участок bc соответствует более высоким давлениям газа, при которых все активные центры заняты, поэтому, несмотря на возрастание давления от p_1 до p_2 , количество адсорбированного газа остается примерно постоянным.

При давлениях, превышающих p_2 , снова начинается возрастание количества адсорбированного газа с давлением, когда на первом, мономолекулярном, слое начинают удерживаться новые. Однако условия, при которых получается многослойная адсорбция или, иначе говоря, *полимолекулярный слой*, можно создать только при достаточно высоких давлениях, а также если газ при соприкосновении с твердым телом охлаждается до температуры ниже критической.

Если в качестве адсорбентов пользоваться такими веществами, как активированный уголь, силикагель, цеолит и т. п., обладающими огромным количеством очень узких пор, то и при низких давлениях может происходить многослойная адсорбция. Последней благоприятствуют проявляющиеся здесь капиллярные силы; правда, и эта так называемая *капиллярная адсорбция* возникает при достаточно низких температурах адсорбента.

На рис. 3.2 нижняя изотерма также выражает зависимость количества адсорбированного газа от давления, но при температуре $T_2 > T_1$. Мы видим, что при более высокой температуре адсорбция также возрастает с давлением, но количество адсорбированного газа при том же давлении меньше.

Изотермы, изображенные на рис. 3.2, как уже выше было отмечено, взяты нами в качестве примера. В зависимости от природы твердого тела и адсорбируемого им газа, а также от удельной поверхности адсорбента изотермы адсорбции могут иметь иной вид.

В заключение описания физической адсорбции отметим, что под влиянием неоднородности силового поля на поверхности адсорбента адсорбированные молекулы газа могут перемещаться (мигрировать) по его поверхности. Это перемещение называется *поверхностной диффузией* молекул газа.

Химическая адсорбция

Химическая адсорбция (или хемосорбция) аналогично физической также является следствием взаимодействия молекул газа и твердого тела в активных адсорбционных центрах на его поверхности. Поэтому описание межмолекулярного взаимодействия, относящееся к различным видам молекул газа и кристаллических решеток адсорбента при физической адсорбции, можно отнести и к хемосорбции.

Однако, как уже говорилось выше, для хемосорбции требуется приведение молекул газа в более активное состояние, в результате которого при достаточном сближении с поверхностью твердого тела они претерпевают более глубокие изменения, становятся более активными и адсорбируются более прочно.

К таким изменениям относятся, например, диссоциация молекул на атомы, перераспределение электронов в молекулах и т. п. Однако до образования химического соединения при хемосорбции дело не доходит.

В связи с необходимостью для химической адсорбции приведения молекул газа в более активное состояние приходится повышать температуру адсорбента. Однако, если твердое тело с химически адсорбированным газом подвергать нагреванию до температуры, более высокой, чем это требуется для устойчивости химически адсорбированного слоя, то газ можно частично снова удалить с поверхности твердого тела.

Таким образом, процесс хемосорбции в отличие от физической адсорбции обладает лишь *частичной обратимостью*.

В заключение отметим, что химически адсорбированные молекулы (атомы) газа, принимая вместе с частицами твердого тела участие в тепловом движении, при достаточной амплитуде колебаний могут проникать внутрь твердого тела.

Десорбция

С явлением десорбции приходится считаться при использовании твердых материалов (деталей), помещаемых внутри вакуумного сосуда.

Обычно детали изготавливаются в газовой атмосфере при высоком давлении, в результате они сорбируют

газы до определенного уровня, соответствующего равновесию между сорбцией и десорбцией.

Если эти детали поместить в вакуум, непрерывно поддерживаемый насосами, равновесие нарушится, начнет преобладать десорбция. После достаточно длительного времени пребывания в вакууме равновесное состояние снова восстановится, но уже при меньшем газосодержании.

Теория процессов адсорбции и десорбции показывает, что для уменьшения количества адсорбированного на поверхности газа необходимо повышать температуру (рис. 3.2).

Глава четвертая

РАСТВОРИМОСТЬ, ГАЗСОДЕРЖАНИЕ, ДИФфуЗИЯ, ПРОНИЦАЕМОСТЬ

4.1. РАСТВОРИМОСТЬ И ГАЗСОДЕРЖАНИЕ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Проникновение газов возможно только при условии, что газ сначала адсорбируется на поверхности твердого тела и затем растворяется в нем. Проникающие внутрь кристаллической решетки твердого тела молекулы (атомы) окружающего газа, занимая свободные узлы или места между узлами решетки, продолжают принимать участие в тепловом (колебательном) движении молекул (атомов) твердого тела. При достаточно большой амплитуде тепловых колебаний молекулы (атомы) растворяющегося газа срываются с занятых им мест и диффундируют на новые места. Перемещаясь таким путем преимущественно в сторону меньшей концентрации, газ постепенно распространяется по всему объему твердого тела.

При достаточно длительной выдержке концентрация газа в твердом теле становится максимально возможной для данных условий (давления газа и температуры твердого тела). В результате раствор газа в твердом теле становится насыщенным. Этим максимальным газосодержанием и определяется *растворимость газа в твердом теле*. Растворимость измеряется количеством газа, растворившегося до насыщения в определенном объеме твердого тела. Единица растворимости $\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{м}^3}$.

В зависимости от природы газа и твердого тела растворимость изменяется в широких пределах.

В неметаллах молекулы газа при растворении *не диссоциируют на атомы*, и растворимость при постоянной температуре прямо пропорциональна давлению p . При растворении в металлах молекулы газа *диссоциируют на атомы*, в связи с чем, например, для двухатомных газов наблюдается пропорциональность растворимости ⁴квадратному корню из давления газа. В общем виде для металлов растворимость пропорциональна $\sqrt{j p}$, где j равно числу атомов в молекуле растворяющегося газа.

Растворимость газа в твердом теле зависит также от температуры, но однозначной зависимости не существует.

Обычно химические элементы делят на группы в зависимости от характера взаимодействия с *водородом*. При этом выделяют пять групп.

С металлами первой группы, к которой относятся Ni, Fe, Co, Cr, Cu, Al, Mo, W, Pt, водород образует твердые растворы. Растворимость *водорода в металлах первой группы увеличивается с увеличением температуры*. Эти металлы и их сплавы в вакуумной технике чаще всего используются в качестве конструкционных материалов.

В металлах второй группы, к которым относятся Ti, V, Zr, Nb, La, Ce, Ta, Th, Pd, Hf и другие металлы групп IIIa, IV и Va периодической системы элементов, *растворимость водорода уменьшается при увеличении температуры*.

Элементами третьей группы, к которым относятся C, Si, Se, As и металлы групп IVb, Vb и VIb периодической системы элементов, взаимодействуют с водородом с образованием гидридов вида H_2S , AsH_3 , SiH_4 .

К четвертой группе относятся щелочные и щелочноземельные металлы, образующие ионные гидриды, подобные $NaNH_2$, CaH_2 .

К пятой группе относятся металлы Au, Sn, Zn, Tl, в которых *водород не растворяется*.

Выражение, характеризующее количество растворяющегося в твердом теле газа, имеет вид:

$$s = s_p p^{1/j} e^{\pm E_p / j R_0 T} \quad (4.1)$$

где s_p — константа растворимости;

E_p — энергия активации растворимости;

p — давление растворяющегося над твердым телом газа;

j — коэффициент, зависящий от характера взаимодействия газа с твердым телом, равный единице для систем с молекулярным взаимодействием (неметаллы — газы) и числу атомов в молекуле газов, растворяющихся в твердых телах (обычно металлы) в атомарном виде;

T — температура твердого тела;

R_0 — универсальная газовая постоянная.

Выражение (4.1) удобно использовать в виде

$$\lg s = \lg s_p + \frac{1}{j} \lg p \pm \frac{E_p}{2,303jR_0} \frac{1}{T}. \quad (4.2)$$

Тогда графически уравнение (4.2) в координатах $\lg s$, $1/T$ для фиксированного значения давления изображается прямой линией, пересекающей ось ординат в точке $\lg s_p + \frac{1}{j} \lg p$ и наклоненной к оси абсцисс под углом, тангенс которого равен $E_p/(2,303jR_0)$.

Значения растворимости для ряда систем «газ — твердое тело» приведены в приложениях 2 и 3.

Обычно даются значения растворимости для давления 10^5 или 10^2 Па. В тех случаях, когда надо найти значение растворимости при другом давлении p газа, зная его растворимость при 10^5 Па, надо из известного значения $\lg s$ вычесть $\frac{1}{j} \lg 10^5$ и прибавить $\frac{1}{j} \lg p$.

Имея значение растворимости при двух различных температурах, можно найти его при любой третьей температуре, экстраполируя (интерполируя) значения растворимости графически или аналитически в координатах $\lg s$, $1/T$ прямой линией. Однако этот прием можно применять только в случае, если в твердом теле в используемом диапазоне температур не происходят фазовые превращения, при которых могут меняться константа и энергия активации растворимости.

В металлах первой группы с возрастанием температуры растворимость водорода увеличивается, и, таким образом, в выражениях (4.1) и (4.2) в показателе экспоненты и перед последним слагаемым соответственно стоит знак «минус».

В металлах второй группы с возрастанием температуры растворимость водорода уменьшается, и, таким образом, в выражениях (4.1) и (4.2) в показателе экспоненты и перед последним слагаемым стоит знак «плюс».

При комнатной температуре растворимость водорода в металлах второй группы на три-четыре порядка больше, чем в металлах первой группы, что объясняет применение их в качестве газопоглотителей.

Азот растворяется в металлах обычно меньше, чем водород. Азот, как и водород, растворяется в атомарном состоянии, причем с увеличением температуры растворимость уменьшается. Как правило, азот растворяется только в тех металлах, которые могут образовывать нитриды.

Кислород растворяется в металлах, в виде окислов, хотя при малых концентрациях он может образовывать твердые растворы. Растворимость кислорода, как правило, увеличивается с ростом температуры.

Газосодержание представляет собой растворимость в равновесном состоянии, т. е. в случае, когда материал в течение длительного времени выдерживался в условиях, для которых рассчитана растворимость. Это обстоятельство позволяет находить газосодержание, если известна закономерность изменения растворимости для исследуемой системы «газ — твердое тело». Экспериментальное определение газосодержания сопряжено со значительными трудностями, так как для этого металлы необходимо выдерживать в расплавленном состоянии, при котором трудно исключить реакцию с тиглем и учесть его газовыделение. По этой причине газосодержание определено лишь для немногих материалов. Значения газосодержания для некоторых материалов приведены в приложении 4.

В тех случаях, когда отсутствуют данные по газосодержанию и нельзя воспользоваться значениями растворимости (условия получения металла или его предварительной термической обработки нельзя считать приводящими к равновесному состоянию системы «газ — металл»), используют значения газовыделения, полученные при длительном отжиге образцов (см. приложение 8).

Газовыделение всегда меньше газосодержания, так как в подавляющем большинстве случаев приблизительно *треть газа выделяется только после расплавления.*

Учитывая это обстоятельство, с приемлемой точностью можно принимать, что газосодержание материала на 25—35% больше его газовыделения.

4.2. ДИФфуЗИЯ ГАЗОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ И ПРОНИЦАЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Ввиду важной роли, которую играет диффузия газов при их взаимодействии с твердыми телами, обратимся к рассмотрению закономерностей, которым подчиняется это явление.

Механизм проницаемости газа сквозь твердое тело можно представить как процесс растворения газа в материале со стороны высокого давления, диффузии в направлении убывающей концентрации и последующего выделения газа на стороне низкого давления.

Удельным потоком диффузии газа в твердом теле называется количество газа, диффундирующее в единицу времени через единичную площадку в направлении, перпендикулярном этой площадке.

Процессы диффузии газов в твердых телах описываются уравнениями (1.42) и (1.46).

Эти уравнения для случая диффузии газов в твердых телах имеют вид:

$$q' = D \frac{\partial N_{1TB}}{\partial Z}; \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial N_{1TB}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N_{1TB}}{\partial Z^2}, \quad (4.4)$$

где q' — удельный поток диффузии газа в твердом теле;

D — коэффициент диффузии газа в твердом теле;

N_{1TB} — объемная концентрация газа в твердом теле на расстоянии Z от начала координат, изменяющаяся во времени t ;

$\frac{\partial N_{1TB}}{\partial Z}$ — градиент объемной концентрации газа в твердом теле;

$\frac{\partial^2 N_{1TB}}{\partial Z^2}$ — изменение градиента концентрации в направлении координаты Z ;

$\frac{\partial N_{1TB}}{\partial t}$ — скорость изменения объемной концентрации газа в твердом теле.

Коэффициент диффузии газа в твердом теле D зависит от температуры твердого тела следующим образом:

$$D = D_0 e^{-E_d / j R_0 T} \quad (4.5)$$

где D_0 — константа диффузии, зависящая от свойств системы «твердое тело — газ» (приложение 5);
 E_d — энергия активации диффузии для данной системы «твердое тело — газ» (приложение 5);
 R_0 — универсальная газовая постоянная;
 j — коэффициент, имеющий то же значение, что и в уравнении (4.1);
 T — абсолютная температура твердого тела.

Уравнение (4.5) после логарифмирования принимает вид:

$$\lg D = \lg D_0 - \frac{E_d}{2,3jR_0} \frac{1}{T}. \quad (4.6)$$

Графически уравнение (4.6) можно представить в координатах $\lg D$, $1/T$, в виде прямой, что облегчает определение коэффициента диффузии для различных температур.

Как мы видим, математические выражения, описывающие процессы растворения и диффузии, схожи между собой, что является следствием органической взаимосвязи этих явлений.

С явлениями растворения и диффузии газов в твердых телах тесно связана *проницаемость твердых тел*, т. е. их способность пропускать газ через свою среду.

В зависимости от природы системы «газ — твердое тело» проницаемость может быть ничтожно малой и практически не имеющей никакого значения. Но в ряде случаев проницаемостью материалов (например, оболочки вакуумного прибора или вакуумной системы для некоторых газов) пренебрегать нельзя.

Необходимо отметить, что, говоря о проницаемости, мы имеем в виду проникновение газа только через совершенно цельную, не нарушенную твердую стенку; наличие каких-либо дефектов (в виде трещин, пор и других видов течи) при этом исключается.

На основании уравнения (4.3) (первого закона Фика) получены выражения, характеризующие проницаемость газов через стенки, разделяющие сосуды с разными парциальными давлениями газа.

На рис. 4.1 изображена оболочка вакуумного прибора из твердого материала, например стекла, разделяющая сосуды с разными давлениями. С одной стороны оболочки сохраняется относительно высокое давление газа p_1 (например, атмосферное), с другой — значительно более низкое давление p_2 (например, высокий вакуум).

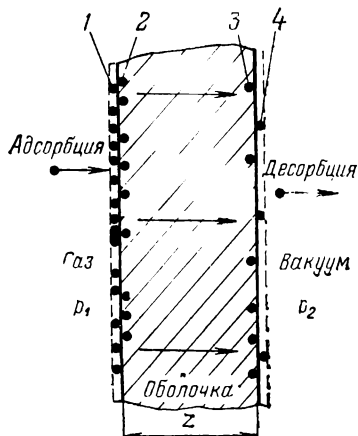


Рис. 4.1. Проникновение газа через оболочку вакуумного прибора.

1 — адсорбированный слой газа с наружной стороны оболочки; 2 — молекулы газа, только что растворившиеся в материале оболочки; стрелки показывают основное направление диффузии растворившихся молекул; 3 — растворившиеся молекулы газа, продиффундировавшие к внутренней стороне оболочки; 4 — молекулы газа, вышедшие на внутреннюю поверхность оболочки.

Адсорбированные на оболочке со стороны высокого давления молекулы 1, растворяясь в материале оболочки, могут постепенно продиффундировать до противоположной поверхности, граничащей с вакуумом, и, выйдя на эту поверхность (молекулы 4), покинуть ее (десорбироваться).

Если давления p_1 и p_2 сохранять постоянными, то в конце концов наступит состояние, когда поток проникающего газа становится *стационарным*, концентрация газа $N_{1\text{тв}}$ в твердом материале вблизи граничных поверхностей остается неизменной. Полагая градиент концентрации газа постоянным по толщине оболочки, формулу (4.3) можно записать в виде

$$q' = D \frac{c_1 - c_2}{z}, \quad (4.7)$$

где c_1 — объемная концентрация газа $N_{1\text{тв}}$ в материале у поверхности, соприкасающейся с пространством, в котором газ находится под давлением p_1 ;

c_2 — объемная концентрация газа $N_{1\text{тв}}$ в материале у поверхности, соприкасающейся с пространством, в котором газ находится под давлением p_2 ;

Z — в данном случае толщина оболочки.

При стационарном процессе концентрация газа в материале зависит от его растворимости, которая в свою очередь пропорциональна давлению газа над поверхностью материала. Учитывая, что при растворении газов в неметаллах молекулы газа не диссоциируют, а в металлах диссоциируют на атомы, можем, как это выполнялось и ранее, записать эту пропорциональность в общем для металлов и неметаллов виде:

$$c_1 = \kappa_c p_1^{1/j} \text{ и } c_2 = \kappa_c p_2^{1/j} \quad (4.8)$$

где κ_c — коэффициент пропорциональности, значение которого на основании выражения (4.1) равно:

$$\kappa_c = s_p e^{\frac{E_p}{jR_0T}} \quad (4.9)$$

где s_p — константа растворимости;

E_p — энергия активации растворимости.

В результате получим следующее выражение для удельного потока газа q' через стенку толщиной Z , отнесенного к единице ее поверхности:

$$q' = D \frac{\kappa_c}{Z} (p_1^{1/j} - p_2^{1/j}), \quad (4.10)$$

где D — коэффициент диффузии.

Проницаемость выражается в тех же единицах, что и поток разреженного газа, отнесенный к единице площади поверхности стенки, разделяющей сосуда с разными давлениями.

В выражении (4.10) произведение $D\kappa_c$ характеризует проницаемость стенки для данной системы «твердое тело — газ» и может быть заменено коэффициентом проницаемости $\kappa_{\text{пр}}$, который также экспоненциально зависит от температуры твердого тела:

$$\kappa_{\text{пр}} = \kappa_0 e^{-\frac{E_{\text{пр}}}{jR_0T}} \quad (4.11)$$

где κ_0 — константа проницаемости для данной системы «твердое тело — газ»;

$E_{\text{пр}}$ — энергия активации проницаемости;

R_0 — универсальная газовая постоянная;

j — коэффициент, имеющий то же значение, что и в выражении (4.1);

T — абсолютная температура твердого тела.

Энергия активации проницаемости $E_{пр}$ мало отличается от энергии активации диффузии E_d , если растворимость газов в рассматриваемом материале слабо меняется с температурой. Если $p_2^{1/j} \ll p_1^{1/j}$ так, что практически можно считать $p_2^{1/j} = 0$, то для стенки единичной толщины, учитывая выражения (4.1), (4.9) и (4.10), можно записать:

$$q' = sD, \quad (4.12)$$

где q' — удельный поток газа, проникающего через стенку единичной толщины (проницаемость),

$$\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}};$$

s — растворимость, $\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{м}^3}$;

D — коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

Соотношение (4.12) позволяет, если известны две величины из трех (коэффициент диффузии и растворимость или проницаемость), определить третью.

Экспериментальные данные по проницаемости обычно приводятся для условий, когда с одной стороны стенки соприкасается с вакуумом и давление p_2 можно принять равным нулю. В этом случае с учетом (4.11) уравнение (4.10) запишется в виде

$$q' = \frac{\kappa_{пр}}{Z} p_1^{1/j} = \frac{\kappa_0}{Z} p_1^{1/j} e^{-\frac{E_{пр}}{jR\theta T}} \quad (4.13)$$

В приложении 6 приведены значения константы проницаемости κ_0 и энергии активации проницаемости $E_{пр}$ для различных систем «газ — материал». Там же даны удельные потоки проницаемости q'_1 при давлении 1 Па и указанных температурах для материала толщиной 1 м.

Для определения проницаемости при другом давлении необходимо произвести пересчет по методике, аналогичной той, что приведена для растворимости. При внешних давлениях существенно ниже атмосферного проницаемость оказывается меньшей, чем это следует из уравнения (4.10), что связано с заполнением адсорбированным газом лишь части поверхности, которая характеризуется коэффициентом θ , определяемым урав-

нением (3.1). С учетом этого обстоятельства уравнение (4.10) примет вид:

$$q' = \frac{\kappa_{\text{гр}}}{Z} (\theta_1 p_1^{1/2} - \theta_2 p_2^{1/2}), \quad (4.14)$$

где θ_1 и θ_2 — коэффициенты заполнения поверхности соответственно при давлениях p_1 и p_2 .

В практической работе следует считаться с проницаемостью стекла и керамических материалов для гелия, водорода и неона как газов, имеющих наименьшие диаметры частиц, а также с проницаемостью металлов главным образом для водорода.

4.3. НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ПРОЦЕСС ДИФфуЗИИ

Нестационарные процессы диффузии наблюдаются при обезгаживании материала либо, напротив, при поглощении им газа, что характерно для деталей электровакуумных приборов и нагреваемых элементов вакуумных систем.

Как уже отмечалось, обычно все твердые материалы (детали) изготавливаются в газовой атмосфере при достаточно высоком давлении. В результате газового окружения они адсорбируют газы до определенного газосодержания, соответствующего равновесию между сорбцией и десорбцией.

Для уменьшения газовыделения материала (детали) его подвергают обезгаживанию в вакууме. Однако если при обезгаживании в вакууме ограничиться комнатной температурой, то процесс обезгаживания из-за малости коэффициента диффузии газов в твердых телах при относительно низких температурах будет протекать слишком медленно. Формула (4.5) показывает, что коэффициент диффузии экспоненциально зависит от температуры; следовательно, для эффективного обезгаживания твердого тела необходимо его выдержать в вакууме при достаточно высокой температуре.

Скорость процесса обезгаживания в большой мере зависит также от природы как твердого тела, так и содержащихся в нем газов.

При обезгаживании материалов в вакууме концентрация газа в твердом теле $N_{\text{гтв}}$ уменьшается со временем, т. е. имеет место *нестационарный процесс диффузии*, при котором меняются объемная концентрация газа $N_{\text{гтв}}$ и ее градиент $\partial N_{\text{гтв}} / \partial Z$. Этот процесс подчиня-

няется второму закону Фика и описывается уравнением (4.4).

Поток газа, выделяющийся с поверхности твердого тела, при этих условиях рассчитывается по уравнению (4.3), в которое подставляют значение градиента концентрации газа на поверхности твердого тела, найденное из решений уравнения (4.4).

Решения уравнения (4.4) получаются разными для тел с различной геометрической формой.

В качестве *начального условия* при решении уравнения (4.4) обычно принимают, что концентрация газа в твердом теле в момент времени $t=0$ одинакова по всему его объему.

В качестве *граничного условия* полагают, что на поверхности твердого тела (границе «газ — твердое тело») концентрация газа определяется давлением его над поверхностью твердого тела. Если речь идет об обезгаживании материала в вакууме, то обычно принимают, что давление газа над поверхностью и соответственно концентрация газа на границе твердого тела с вакуумом равны нулю.

Однако решения уравнения (4.4) имеют сложный вид, и пользоваться ими при практических расчетах нет нужды, так как значения коэффициентов диффузии и начальной концентрации, найденные по литературным данным или определенные экспериментально, могут значительно отличаться от фактических, что снижает точность расчетов. В связи с этим с достаточной для практических расчетов точностью (ошибка не более 10%) можно воспользоваться решениями уравнения второго закона Фика, полученными Б. Б. Дейтоном в предположении, что изменение градиента концентрации газа по толщине материала подчиняется *линейному закону*. Полученные при этом выражения для скорости удельного газовыделения имеют достаточно простой вид. При этом уравнение, характеризующее удельный поток газа q' для *полубесконечного твердого тела*, т. е. тела большой протяженности в направлении потока диффузии и обезгаживаемого с одной стороны, имеет вид:

$$q' = \frac{c_0 - c_1}{2} \sqrt{\frac{D}{t}}, \quad (4.15)$$

где c_0 — начальная концентрация газа в твердом теле;

c_1 — концентрация газа на границе «твердое тело — газ»;

D — коэффициент диффузии;

t — длительность обезгаживания.

Обычно при обезгаживании в вакууме $c_0 \gg c_1$, поэтому в дальнейшем в формулах для расчета газовой выделенности из пластины и цилиндра вместо разности $c_0 - c_1$ используется практически равная ей величина c_0 .

Для пластины (тела конечной толщины с относительно большими размерами в двух других измерениях) удельный поток газа определяется следующими выражениями:

1.

$$q' = \frac{c_0}{2} \sqrt{\frac{D}{t}}, \quad (4.16)$$

если

$$t < \frac{\pi Z^2}{64D}, \quad (4.17)$$

где Z — толщина обезгаживаемой пластины;

D — коэффициент диффузии рассматриваемой системы «материал — газ» при заданной температуре.

При этом глубина обезгаживания (расстояние от поверхности тела до места, где концентрация газа принимается равной начальному значению, c_0) может быть определена по формуле

$$\delta = 2\sqrt{Dt}. \quad (4.18)$$

- Эта формула справедлива до тех пор, пока $\delta \leq Z/2$. При этом, когда $\delta < Z/2$, количество удаленных из твердого тела газов меньше половины начального газосодержания, а при $\delta = Z/2$ — половине начального газосодержания.

2. Удельный поток газа q' будет равен:

$$q' = \frac{2c_0 D}{Z} e^{\frac{\pi}{8} - \frac{8D}{Z^2} t} \quad (4.19)$$

если

$$t > \frac{\pi Z^2}{64D}. \quad (4.20)$$

Для цилиндра радиуса R удельный поток газа q' определяется следующими выражениями:

$$q' = c_0 \left[\sqrt{\frac{D}{\pi t}} - \frac{D}{2R} \right], \quad (4.21)$$

если

$$t < \pi R^2 / 24D, \quad (4.22)$$

при этом количество удаленных из твердого тела газов меньше $2/3$;

$$q' = \frac{c_0 D}{R} e^{\pi/4 - 8Dt/R^2}, \quad (4.23)$$

если

$$t > \pi R^2 / 24D. \quad (4.24)$$

Детали часто имеют форму, отличающуюся от бесконечных пластины или цилиндра. Поэтому на практике деталь сложной формы заменяют комбинацией элементов, близких к пластине или цилиндру.

Необходимо указать, что газовыделение из металлов по подавляющему большинству газов во время отжига и откачки ввиду относительной малости коэффициентов диффузии D рассчитывается по уравнению (4.15) и и лишь газовыделение водорода приходится определять по уравнениям (4.16), (4.19), (4.21) или (4.23), учитывая конкретную геометрическую форму обрабатываемых деталей.

При расчетах по формулам (4.15), (4.16), (4.19), (4.21) и (4.23) надо пользоваться значениями концентрации газа в твердом теле, имеющими размерность $\left[\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{м}^3} \right]$. В то же время довольно часто газосодержание или газовыделение относят к единице массы твердого тела. Переход от одной размерности к другой следует проводить по формуле

Объемная Массовая Плотность
концентрация концентрация

$$\left[\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{м}^3} \right] = \left[\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{кг}} \right] \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]. \quad (4.25)$$

ДАВЛЕНИЕ ПАРОВ И ДИССОЦИАЦИЯ ОКИСЛОВ МЕТАЛЛОВ

5.1. ПОНЯТИЯ «ГАЗ» И «ПАР»

Основные технические параметры вакуумной системы и, в частности, предельное остаточное давление в значительной степени определяются давлением паров материалов, примененных при конструировании ее элементов. Особенно важен правильный выбор материалов при создании сверхвысоковакуумных систем, работающих при повышенных температурах. Решающее значение имеет знание характеристик испаряемых материалов в технике получения тонких пленок.

Поведение паров существенно отличается от поведения газов. Критерием, позволяющим определить, является ли то или иное газообразное вещество газом или паром, служит его *критическая температура*, т. е. *температура, выше которой вещество может находиться только в газообразном состоянии (сжатием сконденсировать его невозможно)*.

Газообразное вещество называется *газом*, если его температура выше критической; *паром* — если его температура ниже критической, *иными словами, паром называется газ, находящийся в состоянии, близком к состоянию перехода его в жидкость*.

В табл. 5.1 указаны критические температуры некоторых веществ.

Таблица 5.1

Критические температуры некоторых веществ

Вещество	Критическая температура, К	Вещество	Критическая температура, К
Гелий	5,2	Криптон	209,4
Водород	33	Ксенон	289,7
Неон	45	Двуокись углерода	304
Азот	126	Вода	647
Кислород	155	Ртуть	1460
Аргон	150,6	Железо	3973

Мы видим, что комнатная температура, равная обычно 283—298 К, намного превышает критическую температуру таких веществ, как гелий, водород, неон, азот,

кислород, аргон, криптон, которые, следовательно, в обычных температурных условиях следует считать «постоянными» газами, поскольку они не конденсируются ни при каком сжатии. Такие газообразные вещества, как ксенон и двуокись углерода, к постоянным газам отнести уже нельзя, так как их критические температуры близки к комнатной. Далее мы говорим о водяном паре, о ртутном паре, о парах различных масел, применяемых в вакуумной технике, так как критические температуры этих веществ намного выше комнатной. Наконец, поскольку все металлы имеют критическую температуру порядка тысяч градусов, мы говорим о парах металлов.

5.2. ДАВЛЕНИЕ ПАРОВ МАТЕРИАЛОВ

Известно, что если испарение какого-либо вещества происходит в замкнутом пространстве, в котором поддерживается определенная температура, то по истечении достаточного промежутка времени *наступает состояние насыщения*, т. е. устанавливается постоянное, равновесное давление пара, несмотря на продолжающееся испарение. Насыщение наступает по той причине, что в процессе испарения с возрастанием плотности пара возрастает и количество конденсирующихся молекул (атомов) пара; в момент, когда количество молекул, конденсирующихся в единицу времени, сравняется с количеством молекул, испаряющихся за то же время, устанавливается постоянная плотность пара, а поскольку температура поддерживается постоянной, устанавливается и постоянное давление насыщенного пара.

В вакуумной технике для различных целей применяется ряд жидкостей, которые неизбежно являются источниками паров в вакуумной системе: так, например, применяется ртуть, служащая рабочей жидкостью для некоторых типов вакуумметров и для ртутных пароструйных насосов; существуют масляные пароструйные и масляные вращательные насосы, работающие на специальных маслах. Источниками паров в вакуумных системах могут быть и многие вещества, применяемые в качестве смазок, уплотнителей, поглотителей, покрытий; наконец, в какой-то мере испаряются стенки любого вакуумного сосуда. Все эти жидкости и твердые вещества при определенных температурах имеют определенные давления насыщенных паров, с которыми не-

обходимо считаться в процессе откачки любого сосуда и которые необходимо также учитывать при выборе материала для изготовления оболочки и внутренних деталей вакуумных устройств.

Таблица 5-2 дает представление о давлении насыщенных паров некоторых веществ, применяемых в вакуумной технике.

Таблица 5.2

Давление насыщенного пара некоторых веществ, применяемых в вакуумной технике

Вещество	Давление насыщенного пара при 293 К, Па
Вода	2333
Ртуть	$1,6 \cdot 10^{-1}$
Масло для механических масляных насосов	$1-10^{-3}$
Смазки, уплотнители	$10^{-4}-10^{-8}$
Масло для пароструйных диффузионных насосов	$10^{-6}-10^{-7}$
Стекло	$10^{-12}-10^{-28}$

Если пар находится в состоянии, достаточно далеком от насыщения, то к нему, как и к любому газу, можно применять законы, справедливые для идеальных газов, с тем большим правом, чем меньше его плотность.

Для насыщенных паров справедливы лишь те газовые законы, которые не связаны с изменением параметров состояния. К таким можно отнести законы Авогадро и Дальтона. Что касается законов Бойля—Мариотта, Гей-Люссака и Шарля, то к насыщенным парам их применять нельзя.

Например, закон Бойля—Мариотта становится несправедливым, так как при изменении объема насыщенного пара без изменения его температуры масса пара не остается постоянной; при сжатии происходит дополнительная конденсация, а при расширении — дополнительное испарение, так что давление насыщенного пара сохраняется постоянным (в соответствии с температурой).

В отличие от газа давление насыщенного пара можно изменять только путем изменения его температуры. Зависимость от температуры давления насыщенного пара, когда последнее не превышает 100—150 Па, можно выразить уравнением

$$\ln p = A_{\pi} - B_{\pi}/T, \quad (5.1)$$

где A_n и B_n — постоянные, которые зависят от рода испаряющегося вещества;

T — температура.

Не следует забывать, что если с повышением температуры источник пара полностью испарится, то при дальнейшем нагревании пар, очевидно, перестанет быть насыщенным и, поскольку его масса остается постоянной, будет подчиняться всем газовым законам.

В большинстве случаев зависимости давления паров металлов получены на основании замеров скорости испарения или убыли массы образцов. Исходя из уравнений (1.1), (1.21), (1.22) и (1.28), получим удельный поток массы испаряющегося материала, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$:

$$G_n = \frac{p}{4} \sqrt{\frac{8M}{\pi R_0 T}} = 4,38 \cdot 10^{-3} p \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (5.2)$$

где p — давление паров материала, Па;

M — молекулярная масса материала, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$;

R_0 — универсальная газовая постоянная;

T — температура, К.

В логарифмической форме уравнение (5.2) имеет вид:

$$\lg G_n = -2,368 + \lg p + 0,5 \lg \frac{M}{T}. \quad (5.3)$$

Полезно помнить следующее правило: *при повышении температуры на 5% давление паров и удельный поток массы испаряющегося материала возрастают в 10 раз.*

5.3. ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ В ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЕ, ТЕМПЕРАТУРА ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ КОТОРОЙ НЕОДИНАКОВА

Вакуумная система состоит обычно из насосов с рабочими жидкостями, трубопровода, соединяющего откачиваемый сосуд с насосами, манометрических преобразователей, кранов и других деталей, в которых может находиться какой-либо источник пара. Как правило, все эти элементы вакуумной системы имеют в рабочем состоянии различные температуры: например, масло в механическом вакуумном насосе может нагреться до 323 К и выше, рабочая жидкость пароструйного насоса — до температуры 373—473 К; в пароструйном насо-

се имеется также холодильник, стенки которого охлаждаются обычно проточной водой; большая часть вакуумного трубопровода имеет комнатную температуру; если откачиваются электровакуумные приборы, то они обычно подвергаются прогреву до температуры в несколько сотен градусов; в определенном месте трубопровода часто помещается так называемая ловушка для вымораживания (т. е. интенсивной конденсации) паров, стенки которой могут быть охлаждены до температуры кипения жидкого азота (77 К).

Какой же температурой определяется давление насыщенных паров тех жидкостей и твердых веществ, которые находятся в вакуумной системе? Чтобы правильно ориентироваться в тех практических случаях, с которыми приходится иметь дело в вакуумной технике, нужно иметь в виду следующее:

если различные участки вакуумной системы имеют разную температуру, то давления насыщенных паров в ней стремятся к значениям, соответствующим температуре наиболее холодного участка;

при этом в пространстве вакуумной системы, отделенном от источника пара наиболее холодным участком, давление насыщенного пара после достаточного промежутка времени устанавливается в соответствии с температурой самого холодного участка;

в пространстве же между самым холодным участком и источником пара, пока испаряющееся вещество не испарится полностью, происходит перегонка этого вещества в наиболее охлажденный участок.

Для примера проследим за изменением давления ртутного пара в вакуумной системе лабораторного откачного поста, схематически изображенного на рис. 5.1.

Пока не включены ни проточная вода, ни подогреватель парортутного насоса 4 и не охлаждаются стенки ловушки 3, давление насыщенного пара ртути во всей системе соответствует комнатной температуре и, например, при 293 К равно $1,6 \cdot 10^{-1}$ Па.

После включения проточной воды самая низкая температура, например 283 К, устанавливается на стенках холодильника парортутного насоса; в соответствии с этим понижением температуры падает и давление насыщенного пара ртути в части вакуумной системы над парортутным насосом (даже если его подогреватель включен и ртуть нагрелась до кипения).

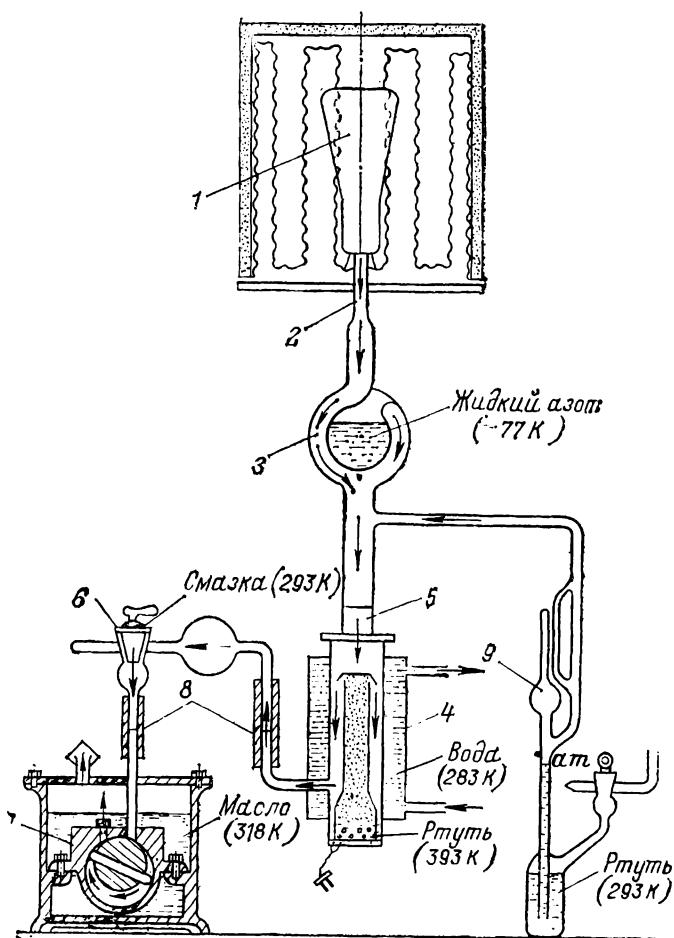


Рис. 5.1. Примерная вакуумная схема лабораторного откачного поста.

1 — электровакуумный прибор, припаянный к вакуумной системе и расположенный в печи для его прогрева во время откачки; 2 — откачной штенгель, через который производится откачка прибора; 3 — стеклянная азотная ловушка, предназначенная для вымораживания паров рабочей жидкости насоса 4; 4 — металлический парортутный диффузионный насос; 5 — металлостеклянный переход для присоединения стеклянного трубопровода к металлической трубке насоса; 6 — стеклянный кран с уплотняющей органической смазкой; 7 — механический вакуумный насос с масляным уплотнением; 8 — резиновые шланги; 9 — ртутный компрессионный манометр; ат — атмосфера.

Наконец, самое низкое давление насыщенного ртутного пара устанавливается в части вакуумной системы над ловушкой после охлаждения ее стенок, например, жидким азотом (до 77 К), так как ртутный пар, имеющийся в вакуумной системе, включая и распространяющийся из парортутного насоса, конденсируется на стенках ловушки.

Задача 5.1. Некоторое количество водяного пара при температуре 293 К занимает объем 300 см³, создавая при этом давление 6,7·10² Па. Какое установится давление водяного пара при той же температуре, если занимаемый им объем уменьшить: 1) до 100 см³; 2) до 10 см³; 3) до 1 см³ (использовать табл. 5.2).

Ответ: 1) 2·10³ Па; 2) 2,333·10³ Па; 3) 2,333·10³ Па.

Задача 5.2. В некотором сосуде имеется смесь газов (N₂, O₂) и паров (H₂O, Hg) с парциальными давлениями при температуре 293 К:

$$N_2 — 1,066 \cdot 10^{-2} \text{ Па};$$

$$O_2 — 2,666 \cdot 10^{-3} \text{ Па};$$

$$H_2O — 1,333 \text{ Па};$$

$$Hg — 1,333 \cdot 10^{-1} \text{ Па}.$$

Определить полное давление смеси, если, не изменяя температуру, объем сосуда уменьшить: 1) в 10 раз; 2) в 10 000 раз.

Ответ: 1) 13,62 Па; 2) 2,47·10³ Па.

Задача 5.3. Рассчитать давление ртутного пара, создаваемого полностью испарившейся каплей ртути массой 1 г в замкнутом сосуде с объемом 100 см³ при температуре 557°C.

Ответ: 3,43·10³ Па.

Задача 5.4. Какое количество ртути надо поместить в замкнутый сосуд с объемом 100 см³ при температуре 830 К, чтобы при полном испарении ртути достигалось насыщение сосуда ртутным паром; давление насыщенного пара ртути при температуре 830 К равно 1,333·10⁴ Па.

Ответ: 3,88 г.

5.4. ТЕРМИЧЕСКАЯ ДИССОЦИАЦИЯ ОКИСЛОВ МЕТАЛЛОВ

Наличие окисленных поверхностей или растворенных в материале окислов часто является причиной практически неизбежного газовыделения в вакуумной системе и невозможности достижения необходимого разрежения. В связи с этим поведение окисленных материалов при повышенных температурах в вакууме представляет значительный интерес при конструировании и эксплуатации вакуумных систем.

Проследим влияние химических соединений металлов при различных температурах и давлениях на откачку и последующие характеристики вакуумных систем на примере откачиваемого электровакуумного прибора с оксидным катодом. Освобождающиеся во время обработки (активировки) катода газы (в том числе кислород) могут взаимодействовать с элементами оболочки прибора с образованием окислов. Наконец, практически всегда металлы, находившиеся даже

очень небольшое время на воздухе, покрыты пленками окислов. Таким образом, окислы являются одним из самых распространенных неорганических соединений.

Важнейшей характеристикой реакций окисления — восстановления металлов является *давление диссоциации окислов*, показывающее направление реакции при данных температуре и давлении кислорода над поверхностью твердого тела (металла).

Экспериментальные данные показывают, что при обычных температурах обезгаживания (600—750 К) вакуумных систем и их элементов давления кислорода для большинства окислов металлов весьма малы, т. е. эти соединения устойчивы и практически не диссоциируют. Исключение составляют лишь соединения CuO , MnO_2 , Mn_2O_3 и Mn_2O_4 , а также Ag_2O , PdO и HgO .

Восстановление основных окислов металлов может быть осуществлено с помощью водорода, углерода, легко окисляющихся металлов или с помощью других восстановительных сред. Если давление O_2 меньше $7 \cdot 10^{-8}$ Па, то при температуре 900 К происходит диссоциация Si_2O . При этой же температуре Si_2O восстанавливается водородом, если отношение давления паров воды к давлению водорода меньше $2,83 \cdot 10^5$. Из этого следует вывод, что для восстановления меди из Si_2O в вакууме при температуре 900 К необходимо, чтобы давление в камере печи было меньше $7 \cdot 10^{-8}$ Па. Заметим, что восстановление меди в водородной печи будет происходить в атмосфере даже очень влажного водорода. Практически все окислы меди восстанавливаются водородом при температурах около 800 К.

Окислы железа гораздо устойчивей, и поэтому их восстановление водородом до металла возможно лишь при давлениях водорода, превышающих давления паров воды от 2 до 1000 раз.

Никель восстанавливается водородом при отношении давлений $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ меньше 100. Для восстановления какого-либо окисла окисью углерода отношение CO_2/CO должно быть того же порядка, что и отношение давлений $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ при восстановлении аналогичного окисла водородом.

Глава шестая

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВАКУУМНЫХ НАСОСАХ

6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Промышленные вакуумные насосы работают в области давлений от 10^5 до 10^{-10} Па. При большом различии в принципах действия и конструкциях, обусловленном многообразием требований к откачному оборудованию, во всех вакуумных насосах для откачки газа используется один из двух способов:

а) перемещение газа за счет приложения к нему механических сил в некотором месте вакуумной системы, откуда газ выталкивается;

б) связывание газа путем сорбции, химических реакций или конденсации обычно в замкнутой вакуумной системе.

По принципу действия промышленные вакуумные насосы, используемые для получения давлений меньше 10^2 Па, разделяют на следующие группы:

1. *Насосы объемного действия*, в которых перемещение газа осуществляется путем периодического изменения объема рабочей камеры.

2. *Эжекторные насосы*, в которых происходит турбулентно-вязкостное увлечение газа струей рабочей жидкости или пара.

3. *Молекулярные насосы*, которые осуществляют откачку путем сообщения молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости в определенном направлении. Насосы этой группы могут быть *струйными*, действие которых основано на сообщении молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости непрерывно истекающей струей пара, и *механическими молекулярными*, в которых эта скорость сообщается движущимися поверхностями твердого тела. (Низкая эксплуатационная надежность ранних моделей механических молекулярных насосов привела к отказу от их применения и к разработке в 1950 г. более совершенных турбомолекуляр-

ных насосов, которые и будут в дальнейшем рассмотрены.)

4. *Сорбционные насосы*, которые осуществляют откачку газов их сорбцией на поверхности или в объеме твердых тел. В эту группу входят и *адсорбционные насосы*, в которых откачка происходит вследствие обратимой физической адсорбции газа при низкой температуре.

5. *Криогенные насосы*, которые осуществляют откачку путем конденсации откачиваемых газов и паров на поверхностях, охлаждаемых до сверхнизких (криогенных) температур. Разновидностями криогенных насосов являются *конденсационные и криосорбционные насосы*.

В названиях насосов не всегда отражается принцип действия, но очень часто отмечаются их конструктивное устройство, используемый материал сорбента (геттера), рабочая жидкость и т. п. Происхождение названий многих насосов будет ясно из дальнейшего изложения. Здесь мы отметим только, что к механическим насосам, откачивающее действие которых достигается за счет механического движения деталей, принято относить все объемные и турбомолекулярные насосы, хотя они различаются как по принципу действия, так и по области применения.

6.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Для расчета вакуумных систем и правильного выбора вакуумных насосов необходимо знать их параметры.

Основными параметрами вакуумных насосов являются наибольшее давление запуска, наибольшее выпускное давление, наибольшее рабочее давление, предельное остаточное давление, быстрота действия и производительность.

Наибольшим давлением запуска $p_{\text{нач}}$ называется наибольшее давление во входном сечении вакуумного насоса, при котором насос может начать работу. Не все насосы (рис. 6.1) способны начинать работу с атмосферного давления; для некоторых необходимо предварительное разрежение — «форвакуум».

Наибольшим выпускным давлением $p_{\text{выб}}$ называется давление в выходном сечении вакуумного насоса, при котором насос еще может осуществлять откачку. Все насосы, у которых наибольшее выпускное давление

ниже атмосферного, должны иметь на выходе так называемый форвакуумный, создающий необходимый форвакуум насос. Рассматриваемый параметр особенно важен для струйных насосов, у которых превышение наибольшего выпускного давления $1-10^2$ Па может привести к разрушению паровой струи и попаданию большого количества пара рабочей жидкости в откачиваемый сосуд. Отметим, что наибольшее выпускное давление струйных насосов практически совпадает с наибольшим давлением запуска. В качестве форвакуумных насосов чаще всего используются насосы объемного действия, например механические вакуумные насосы с масляным уплотнением.

Наибольшим рабочим давлением $p_{\text{раб}}$ называется наибольшее давление во входном сечении вакуумного насоса, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия.

Предельным остаточным давлением $p_{\text{ост}}$ называется наименьшее давление, которое может быть достигнуто при работе насоса без нагрузки, т. е. когда во входное сечение насоса не поступают извне газы или пары.

Невозможность беспредельного понижения давления обусловлена тем, что каждый реальный насос характеризуется натеканием (обратным потоком) газов или паров на собственный вход. Обратный поток может состоять из паров рабочей жидкости, проникающих через механизм насоса, газов, выделяющихся из конструкционных материалов, и газов, натекающих из окружающей среды через неплотности. С понижением

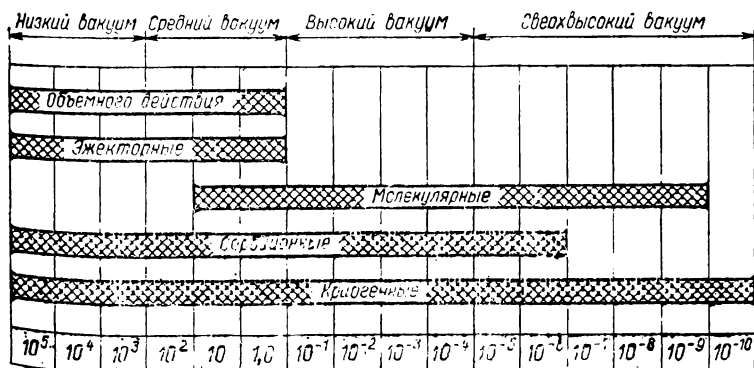


Рис. 6.1. Области действия вакуумных насосов

давления поток откачиваемого газа, проходящий через насос, уменьшается, в то же время обратный поток остается практически неизменным; поэтому наступает момент, когда эти потоки становятся одинаковыми и давление во входном сечении насоса перестает уменьшаться. Это и есть предельное остаточное давление, достигаемое насосом.

У большинства насосов при достижении предельного остаточного давления, кроме остаточных газов, во входном сечении имеются и пары, в связи с чем различают *полное остаточное давление*, т. е. сумму парциальных давлений остаточных газов и паров, и *давление остаточных газов*.

У насосов, в которых применяют рабочие жидкости (насосы с масляным уплотнением, струйные), полное остаточное давление определяется составом и состоянием рабочей жидкости и обычно на порядок выше давления остаточных газов, которое зависит обычно от конструкции и качества изготовления насоса. Очевидно, если откачиваемый сосуд не защищен от проникновения паров рабочей жидкости насоса, то предельное остаточное давление в сосуде или в вакуумной системе не может быть ниже полного остаточного давления насоса.

У насосов без рабочей жидкости (сорбционные, криогенные) остаточное давление паров, как правило, пренебрежимо мало по сравнению с давлением остаточных газов, и для таких насосов в паспорте приводится полное остаточное давление, измеряемое манометрическим преобразователем, не защищенным охлаждаемой ловушкой.

Быстрота действия вакуумного насоса S_n называется быстрота откачки, получаемая во входном сечении насоса при данном давлении, т. е. объем газа, проходящий через впускное сечение насоса в единицу времени при определенном давлении. Быстрота действия большинства насосов практически постоянна в области рабочих давлений и начинает уменьшаться (и даже может стать равной нулю) при достижении давлений, близких к предельному остаточному давлению, а также при превышении наибольшего рабочего давления.

Качество насоса тем лучше, чем шире диапазон давлений, в пределах которого быстрота действия насоса мало изменяется. У многих насосов быстрота действия зависит от рода откачиваемого газа. Для каждого типа

насосов существует кривая зависимости быстроты действия насоса S_H от давления p_H :

$$S_H = f(p_H). \quad (6.1)$$

Быстрота действия высоковакуумного насоса, $\text{м}^3/\text{с}$, может быть определена по формуле

$$S_H = 36,4 \sqrt{\frac{T}{M}} \alpha A \left(1 - \frac{p_{\text{ост}}}{p_H}\right), \quad (6.2)$$

где T — температура газа, К;

M — молекулярная масса, кг/кмоль;

$\alpha \leq 1$ — коэффициент, характеризующий вероятность захвата молекул газа впускным отверстием насоса;

A — площадь впускного отверстия, м^2 ;

$p_{\text{ост}}$ — предельное остаточное давление насоса, Па;

p_H — давление во впускном сечении насоса, Па.

Производительностью насоса Q'_H называется поток газа во входном сечении насоса при данном давлении, т. е. количество газа, уделенное в единицу времени при этом давлении. Производительность насоса, так же как и быстрота действия, зависит от давления и при достижении предельного остаточного давления близка к нулю. Производительность и быстрота действия насоса связаны соотношением

$$Q'_H = p_H S_H, \quad (6.3)$$

где p_H — давление во входном сечении насоса.

6.3. ОБЛАСТИ ДЕЙСТВИЯ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Вакуумные насосы часто разделяют по областям действия, т. е. по диапазонам давлений, в которых они используются.

На рис. 6.1 показаны диапазоны давлений, в которых работают промышленные вакуумные насосы.

Низковакуумные насосы работают в области давлений от $1,03 \cdot 10^5$ Па (атмосферное давление) до 10^2 Па. К этим насосам относятся некоторые насосы объемного действия, эжекторные, адсорбционные, криогенные насосы.

Средневакуумные насосы работают в области давлений 10^2 — 10^{-1} Па. К ним также относятся некоторые насосы объемного действия, эжекторные, пароструйные, бустерные, адсорбционные.

Для быстрого удаления конденсирующихся паров в области среднего и высокого вакуума в циклично работающих вакуумных установках применяют так называемые *азотные ловушки*, т. е. устройства, имеющие развитые металлические поверхности, охлаждаемые до температуры жидкого азота (см. гл. 9).

Высоковакуумные насосы работают в области давлений 10^{-1} — 10^{-5} Па, сверхвысоковакуумные — в области давлений ниже 10^{-5} Па. К ним относятся молекулярные диффузионные паромасляные, диффузионные парортутные, турбомолекулярные, сорбционные (испарительные геттерные, электродуговые геттерные, ионно-геттерные, магнитные электроразрядные) и криогенные насосы. Таким образом, для получения высокого и сверхвысокого вакуума могут использоваться насосы одинакового типа.

Возможность получения сверхвысокого вакуума обычно определяется не столько типом используемого насоса, сколько конструкцией насоса и вакуумной системы и способом их подготовки (предварительной очистки, термического обезгаживания).

В табл. 6.1 и на рис. 6.1 приведены основные параметры вакуумных насосов и области их действия, откуда видно, что рабочие области давлений и быстрота действия у многих типов насосов практически совпадают.

При выборе насоса следует учитывать и такие характеристики, как экономическая эффективность, потребление энергии, охлаждающей воды, расход рабочей жидкости, масса, габариты, частота вращения, уровень шумов, вибрация и т. д. Обычно экономическая эффективность оценивается стоимостью, отнесенной к быстроте действия (первоначальные затраты), и стоимостью эксплуатации, также отнесенной к быстроте действия насоса.

Часто необходимо знать способность насоса откачивать не только воздух, но и другие газы и конденсирующиеся пары; устойчивость насоса к резким повышениям давления во входном и выходном сечениях и прорывам атмосферного воздуха; время, необходимое для запуска и остановки насоса; создаваемый насосом уровень загрязнений откачиваемого сосуда парами рабочей жидкости; состав остаточных газов.

Тип	Давление, Па		Рабочий диапазон давлений, Па	Быстрота действия, л/с	Области применения
	полное остаточное	остаточных газов			

Насосы объемного действия

Водокольцевой	4000—6650	2000—4000	$1,03 \times 10^5$ —4000	1—800	Установки вакуумной сушки. Установки для сушки вымораживанием пищевых продуктов. Черновые трубопроводы централизованных форвакуумных систем. Форвакуумные безмасляные системы
Механический вакуумный насос с масляным уплотнением:	2—0,6	0,27—0,66	$1,03 \times 10^5$ —2,0	0,5—500	Форвакуумные системы насосов, которые для своей работы требуют поддержания определенного разрежения. Установки для дистилляции в вакууме. Установки дегазации жидких металлов
двухступенчатый	0,66—2	10^{-2} — $6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \times 10^5$ —0,66	0,2—50	
Механический вакуумный с деформируемой камерой	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \times 10^5$ — 10^{-1}	0,5—2	Форвакуумные безмасляные системы малой производительности
Многопластинчатый	200—330	200—330	$1,03 \times 10^5$ —200	2—1200	Форвакуумные системы большой производительности

Тип насоса	Давление, Па		Рабочий диапазон давлений, Па	Быстрота действия, л/с	Области применения
	полное остаточное	остаточных газов			
Двухроторный: одноступенчатый	0,66	$6,6 \cdot 10^{-2}$	100—0,66	$15—4 \cdot 10^4$	Централизованные форвакуумные системы. Установки для плавки и литья металлов. Установки вакуумной пропитки. Установки дистилляции в вакууме. Установки сублимационной сушки Форвакуумные системы большой производительности
двухступенчатый	$10^{-2}—10^{-3}$	$10^{-4}—10^{-5}$	100— 10^{-3}	5—50	
Эжекторные насосы					
Водоструйный	100—665	—	$1,03 \times 10^5—100$	0,1—300	Безмасляные форвакуумные системы
Пароэжекторный: низковакуумный	100	—	$1,03 \times 10^5—100$	$5—10^5$	
средневакуумный	$10^{-1}—1,0$	—	$1,03 \times 10^5—10^{-1}$	$10^3—10^5$	
Струйный: пароструйный бустерный	10^{-2}	—	$10—10^{-2}$	100— $3 \cdot 10^4$	Форвакуумные системы большой производительности. Вспомогательные насосы для диффузионных высоковакуумных насосов

Продолжение табл. 6.1

Тип насоса	Давление, Па		Рабочий диапазон давлений Па	Быстродействие, л/с	Области применения
	полное остаточное	остаточных газов			
диффузионный паромасляный	$6,6 \cdot 10^{-7}$	10^{-8}	$10^{-2} - 6,6 \cdot 10^{-7}$	$5 - 2 \cdot 10^8$	Высоковакуумные системы
диффузионный парортутный	—	$10^{-4} - 10^{-10}$	$10 - 10^{-10}$	$5 - 10^4$	Посты откачки ртутных выпрямителей. В лабораторной практике для создания безмасляного вакуума

Молекулярные насосы

Турбомолекулярный	—	$10^{-7} - 10^{-9}$	$1 - 10^{-7}$	$5 - 2 \cdot 10^4$	Централизованные форвакуумные системы. Установки вакуумного отжига. Установки для физических исследований. Установки имитации космического пространства. Установки электровакуумного и полупроводникового производства
-------------------	---	---------------------	---------------	--------------------	--

Сорбционные насосы

Адсорбционный	—	$10^{-1} - 10^{-2}$	$1,03 \times 10^6 - 10^{-1}$	$1 - 10$	Форвакуумные системы для исследовательских и технологических установок
---------------	---	---------------------	------------------------------	----------	--

Тип насоса	Давление, Па		Рабочий диапазон давлений, Па	Быстрота действия, л/с	Области применения
	полное остаточное	остаточных газов			
Испарительный геттерный	—	$10^{-7}—10^{-11}$	$1—10^{-7}$	$1—2 \cdot 10^4$	Высоковакуумные безмасляные системы большой производительности
Электродуговой геттерный	—	$10^{-4}—10^{-5}$	$1—10^{-6}$	$5 \cdot 10^4$ и больше	То же
Ионно-геттерный	—	$10^{-7}—10^{-9}$	$10^{-1}—10^{-7}$	$2—5 \cdot 10^4$	То же
Магнитный электроразрядный	—	$10^{-7}—10^{-9}$	$10^{-1}—10^{-7}$	$0,02—10^4$	Посты откачки электронных приборов

Криогенные насосы*

Конденсационный	—	$10^{-7}—10^{-9}$	$1,03 \times 10^5—10^{-7}$	$50—10^5$ и больше	Высоковакуумные безмасляные системы большой производительности
Криосорбционный	—	$10^{-10}—10^{-13}$	$10^{-1}—10^{-10}$	$500—10^5$	То же

*1л/с
 10^8 л/с

ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ**7.1. ВОДОКОЛЬЦЕВЫЕ НАСОСЫ**

Водокольцевые насосы относятся к насосам объемного действия. На рис. 7.1 показана схема насоса.

При быстром вращении ротора 1, имеющего радиальные лопатки, вода отбрасывается к периферии корпуса 2 и создает водяное кольцо приблизительно постоянной толщины, благодаря которому полости, образуемые лопатками ротора, герметично отделяются друг от друга. Так как ось вращения ротора 1 смещена относительно оси цилиндрической расточки корпуса 2, то при вращении ротора объемы, отсекаемые лопатками, меняются, и, таким образом, создается разреженное

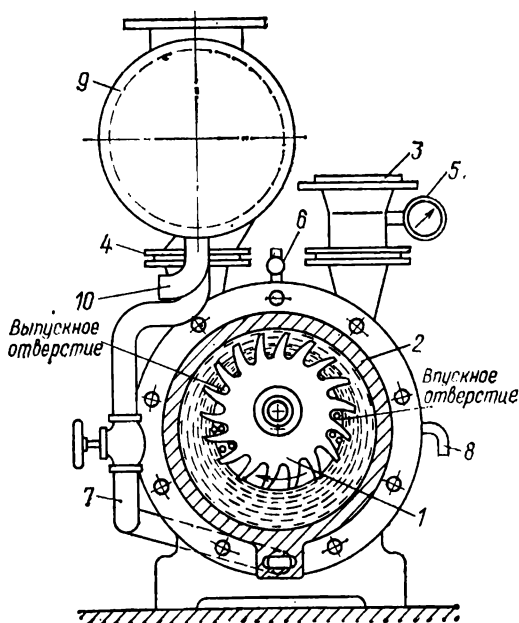


Рис. 7.1. Водокольцевой насос.

1 — ротор; 2 — корпус; 3 — впускная трубка; 4 — выпускной патрубок; 5 — манометр; 6 — подвод воды; 7 — подвод циркуляционной воды с регулирующим краном; 8 — сливная трубка; 9 — водоотстойник; 10 — слив воды.

пространство, обеспечивающее всасывание откачиваемого газа через впускное отверстие и сжатие газа перед выбросом его в атмосферу через выпускное отверстие.

Через выпускное отверстие удаляется также излишек воды, благодаря чему толщина водяного кольца остается постоянной во время работы насоса, несмотря на подвод холодной воды из сети, что необходимо для отвода тепла и для компенсации потерь воды в виде паров и брызг выбрасываемых с откачиваемым газом.

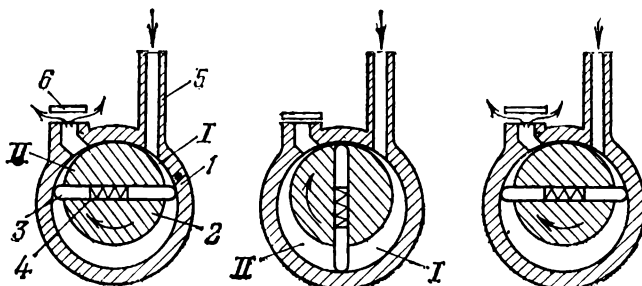


Рис. 7.2. Схема пластинчато-роторного насоса.

Предельное остаточное давление насоса определяется давлением паров воды и составляет примерно 2×10^3 Па при 293 К.

Водокольцевые насосы применяют для откачки черновых трубопроводов централизованных форвакуумных систем, в сушильных установках, а также в качестве безмасляных насосов для форвакуумной откачки.

7.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ С МАСЛЯНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ

Принцип действия

Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением относятся к насосам объемного действия и работают за счет периодического изменения объема рабочей камеры. Механические насосы могут быть пластинчато роторными, пластинчато статорными и плунжерными (золотниковыми).

На рис. 7-2 приведена схема пластинчато-роторного насоса. В цилиндрической расточке камеры насоса 1 вращается в направлении, указанном стрелкой, эксцентрично расположенный ротор 2, в прорези которого свободно вставлены пластины 3 с пружиной 4. При вращении ротора пластины скользят по внутренней поверхности цилиндра, и в камере насоса образуются две полости переменного объема: I (полость всасывания) и

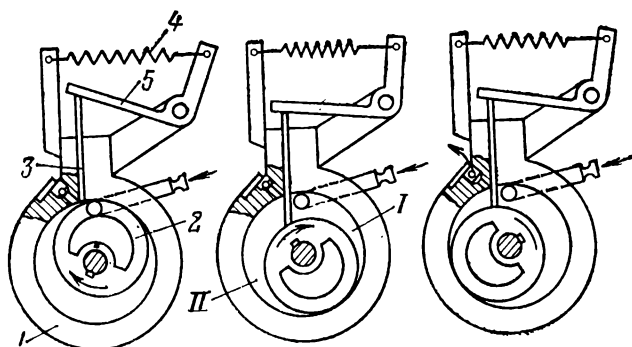


Рис. 7.3. Схема пластинчато-статорного насоса.

II (полость сжатия). Полость всасывания I при вращении ротора увеличивает свой объем, и в нее поступает газ из впускного патрубка 5, связанного с откачиваемым сосудом. Объем полости сжатия II, расположенный на выпускной стороне, уменьшается при вращении ротора, и в ней происходит сжатие газа. Эта полость соединена с клапаном 6. Когда давление газа в полости II станет достаточным для открытия клапана, произойдет выхлоп. В процессе работы зазоры в роторном механизме уплотняются рабочей жидкостью насоса — маслом, благодаря чему обратное перетекание газа с выхода на вход становится ничтожно малым. Масло заполняет и так называемые *вредные пространства*, из которых газ вытесняется при работе роторного механизма (например, объем под клапаном), и исключает их влияние, ведущее к повышению предельного остаточного давления. Одновременно масло обеспечивает смазку и частичное охлаждение механизма насоса. Масло поступает в камеру насоса через зазоры и сверления в корпусе из маслорезервуара, где оно находится под атмосферным давлением, а через выхлопной клапан вновь возвращается в маслорезервуар.

Такую же роль масло выполняет и в других типах насосов с масляным уплотнением, схемы которых мы рассматриваем ниже.

На рис. 7.3 показана схема пластинчато-статорного насоса, в котором пластина 3, разделяющая полости всасывания I и сжатия II, свободно скользит в прорези статора 1, прижимаясь к ротору 2 под действием пружины 4 (через рычаг 5). Путь газа через насос показан стрелками.

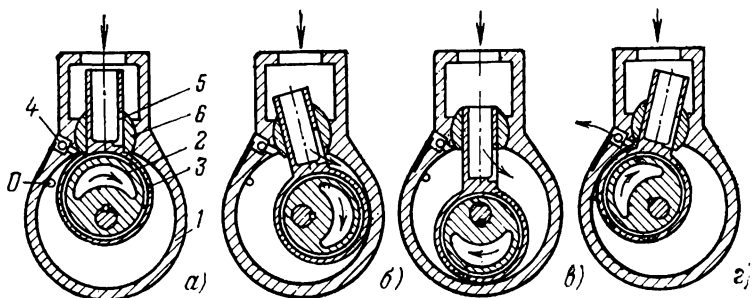


Рис. 7.4. Схема плунжерного (золотникового) насоса.

Схема плунжерного (золотникового) насоса показана на рис. 7.4. В цилиндрической камере корпуса 1 насоса вращается эксцентрик 2 с надетым на него плунжером 3. Газ из откачиваемого сосуда поступает в полость всасывания через окно 5 в прямоугольной части плунжера, который скользит в направляющей 6, свободно поворачивающейся в гнезде корпуса 1. При повороте эксцентрика 2 на некоторый угол от верхнего положения (рис. 7.4,а) окно 5 в прямоугольной части плунжера выходит из направляющей 6 вниз (рис. 7.4,б), полость всасывания соединяется с впускным патрубком насоса и газ поступает в полость всасывания (рис. 7.4,в), непрерывно увеличивающую свой объем, пока окно 5 не будет снова перекрыто (рис. 7.4,г). Одновременно в полости сжатия происходят сжатие и выталкивание газа через выпускной клапан 4. Процесс напуска газа через окно напоминает работу золотникового распределительного устройства, поэтому насосы такого типа получили название золотниковых.

Предельное остаточное давление и некоторые другие параметры механических насосов с масляным уплотнением в значительной степени зависят от свойств рабочей жидкости (масла), залитой в насос. Как газы, так и конденсирующиеся пары, создающие обратный поток, попадают на вход насоса из циркулирующего в нем масла. Перед поступлением в камеру насоса масло некоторое время находится в маслорезервуаре, где подвергается воздействию атмосферного воздуха и поглощает газы. При поступлении масла в рабочую камеру поглощенные ранее газы выделяются из пленки масла и поступают на вход насоса.

У одноступенчатых насосов с масляным уплотнением давление остаточных газов составляет обычно $(2,7-6,6) \cdot 10^{-1}$ Па, а полное остаточное давление 2—6,6 Па.

Пары на входе насоса являются не парами масла, а в основном продуктами его разложения (крекинга). В то время как давление насыщенных паров при комнатной температуре для масел, используемых в насосах с масляным уплотнением, меньше 10^{-2} — 10^{-3} Па, легколетучие продукты крекинга масла имеют гораздо более высокие давления насыщения, что и определяет показание манометрического преобразователя. Крекинг масла в насосах происходит из-за возникновения высоких местных температур в области контактов трущихся поверхностей, которые не полностью разделены слоем масла.

Обратный поток продуктов крекинга масла и других углеводородов составляет (на единицу площади сечения впускного патрубка) $0,1-0,3 \frac{\text{мг}}{\text{ч} \cdot \text{см}^2}$. Наличие обратного потока продуктов крекинга масла приводит к загрязнению откачиваемых сосудов.

Для уменьшения обратного потока, поступающего из насоса в откачиваемый сосуд, во впускном патрубке насоса устанавливают ловушки (см. гл. 9). Кроме продуктов крекинга, на входе насоса обычно имеются пары загрязняющих масло легколетучих веществ (воды, растворителей).

Для получения давлений остаточных газов ниже 10^{-1} Па используют двухступенчатые насосы с масляным уплотнением. Схема такого насоса показана

на на рис. 7.5. Ближайшая к откачиваемому сосуду высоковакуумная ступень *I* должна создавать небольшой перепад давлений (не более 0,1 Па) и поэтому не нуждается в масляном уплотнении, так как при низком давлении узкие зазоры обладают большим сопротивлением потоку газа. Ступень *I* в процессе работы обычно не сообщается с масляным резервуаром ступени *II*, и

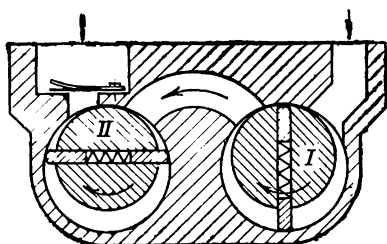


Рис. 7.5. Схема двухступенчатого насоса с масляным уплотнением. *I* и *II* — ступени насоса.

в нее не заносится воздух, растворенный в масле, благодаря чему и возможно достижение низких давлений. Небольшое количество масла, имеющееся в некоторых конструкциях насосов в отдельном маслорезервуаре ступени *I* для смазки механизма, находится под непрерывной откачкой ступенью *II*, так что лег-

кие фракции масла, имеющиеся в ступени *I*, непрерывно откачиваются. Поэтому на входе двухступенчатого насоса количество паров легких фракций масла, определяющих полное остаточное давление, значительно меньше, чем у одноступенчатого.

Давление остаточных газов у лучших образцов двухступенчатых насосов составляет 10^{-3} Па, полное остаточное давление $6,5 \cdot 10^{-1}$ Па. У насосов с масляным уплотнением давление остаточных газов в основном определяется качеством изготовления.

Как уже отмечалось, полное остаточное давление насоса зависит от состава (наличия летучих фракций) и состояния (в первую очередь — от температуры) рабочей жидкости. При повышении температуры масла наблюдается повышение как полного остаточного давления насоса, так и давления остаточных газов.

После запуска холодного насоса установившаяся температура масла ($50\text{—}70^\circ\text{C}$) достигается через 2—3 ч в зависимости от размеров насоса.

Быстрота действия S_n насосов с масляным уплотнением определяется их конструкцией.

Быстрота действия насосов объемного действия практически не зависит от рода откачиваемого газа, так как разница в проводимости входных коммуникаций по

разным газам очень мало сказывается на скорости действия насоса.

Зависимости скорости действия одно- и двухступенчатых насосов от всасывающего давления приведены на рис. 7.6.

Мощность, потребляемая насосами с масляным уплотнением, затрачивается на преодоление трения в механизме насоса (*мощность трения или мощность потерь*) и на процесс перемещения и сжатия газа (*индикаторная мощность*).

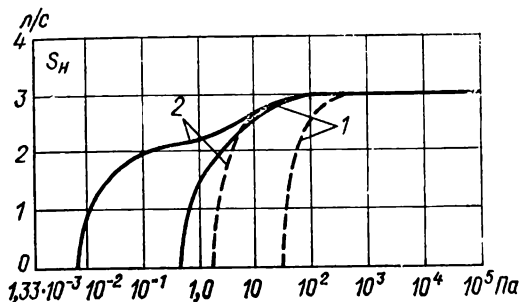


Рис. 7.6. Зависимости скорости действия одноступенчатого (1) и двухступенчатого (2) насосов.

———— без газобалласта; — — — — с газобалластом.

В области низких давлений (ниже 10^3 Па) потребляемая насосом мощность практически остается постоянной и не зависит от давления на впуске.

Эта постоянная мощность в области низких давлений и является мощностью потерь.

Наибольшее давление запуска и наибольшее выпускное давление у механических насосов с масляным уплотнением равны атмосферному. Однако заводы-изготовители не рекомендуют длительную работу при давлении выше $2 \cdot 10^4$ Па, что связано с нежелательным уменьшением количества масла, поступающего в единицу времени в рабочую камеру насоса при повышенных давлениях в ней, а также с выбросами и уносом масла в виде брызг и масляного тумана вместе с потоком откачиваемого газа.

Рабочие жидкости для насосов

В качестве рабочей жидкости насосов с масляным уплотнением, как правило, используются продукты, по-

лучаемые из промышленных минеральных масел. Кроме обычных требований (низкая кислотность, необходимая вязкость, хорошие смазывающие свойства и т. п.), к маслам для вакуумных насосов предъявляются дополнительные: высокая термическая стойкость и низкое давление паров в интервале рабочих температур насоса, так как в противном случае невозможно получение низких предельных остаточных давлений. Давление паров масел для вакуумных насосов приведено в § 17.4.

Конструкции насосов

Пластинчато-роторные насосы выполняются обычно с быстротой действия до 6 л/с. Это объясняется тем, что в местах контакта пластин с камерой насоса достигаются достаточно высокие относительные скорости, что и ограничивает, главным образом, создание крупных пластинчато-роторных насосов.

В плунжерных (золотниковых) насосах трение происходит лишь в направляющей, где относительная скорость сравнительно невелика. Поэтому средние (от 6 до 100 л/с) и крупные (свыше 100 л/с) насосы выполняются плунжерными (золотниковыми).

Недостатком плунжерных (золотниковых) насосов является неуравновешенность движущихся масс.

Пластинчато-статорные насосы просты по конструкции, так как имеют минимальное количество трущихся пар, но из-за больших относительных скоростей пластины и ротора и значительной неуравновешенной массы эксцентричного ротора в настоящее время практически не изготавливаются.

В малых насосах рабочие камеры герметизированы от попадания атмосферного воздуха путем погружения их в коробку с маслом, при этом обычно не требуется дополнительных уплотнений между цилиндрами и торцами рабочих камер. Вал насоса выводится из масляной ванны через самоподтягивающуюся резиновую манжету, предотвращающую течь масла.

Камеры средних и крупных насосов выполняются из вакуум-плотных отливок и не требуют погружения в масляную ванну. Места соединения торцевых крышек с цилиндрами герметизируются в этом случае шеллаком или глифталевым лаком или же резиновыми прокладками. Вал выводится в атмосферу через заполненный мас-

лом сальник с самоподтягивающейся резиновой манжетой.

Входные патрубки малых насосов часто выполняются в виде штуцеров под резиновый шланг, однако длинные участки резиновых шлангов во входных коммуникациях насосов делают невозможным получение низких предельных остаточных давлений из-за большого газо-выделения резины, поэтому в последних моделях малых насосов входные патрубки делаются, как и у крупных, фланцевыми.

Во входных патрубках насосов иногда устанавливают металлические сетки, защищающие механизм насоса от попадания мелких твердых предметов, выводящих насос из строя.

В средних и крупных насосах масляный резервуар выполняется либо заодно с корпусом насоса, либо в виде отдельного бака, соединенного трубками для подачи масла к соответствующим местам насоса. Приемное отверстие трубки или канала для подачи масла в рабочую камеру насоса всегда располагается выше дна масляного резервуара, что предотвращает попадание грязи и воды в насос.

Если на вход остановленного насоса не напустить атмосферный воздух, то масло в резервуаре, находящееся под атмосферным давлением, заполнит камеру насоса, в которой сохраняется разрежение, и поднимется во впускной патрубок и даже в откачиваемый сосуд (если во впускной коммуникации не установлен клапан). Последующий запуск насоса сильно затрудняется необходимостью вытеснить из камеры вязкое масло через выхлопной клапан и вызывает большие нагрузки на механизм насоса при резком пуске двигателя.

Для предотвращения всасывания масла в маслопроводе некоторых средних и крупных насосов устанавливают клапан, который надо открывать непосредственно после запуска и закрывать перед выключением насоса. У дистанционно управляемых насосов в маслопроводах устанавливают электромагнитный клапан, срабатывающий при включении и выключении электродвигателя или приводящийся в действие от центробежного механизма, связанного со шкивом насоса.

Малые насосы, как правило, не имеют запирающих устройств в маслопроводе, поэтому для предотвращения всасывания масла во впускную коммуникацию необхо-

димо напустить воздух на вход остановленного насоса. Масло может проникать в остановленный насос и через выхлопной клапан; чтобы этого не происходило, объем масла, находящийся над выхлопным клапаном, ограничивают, окружая клапаны щитками или кожухами.

Работа насоса при высоких впускных давлениях 10^4 Па сопровождается выбросами брызг и капель масла в выхлопной патрубок вместе с потоком откачиваемого газа. Для устранения этого явления у выхлопного отверстия насоса устанавливают маслоотделители (маслоотбойники), например, в виде щитков. В насосах средних размеров иногда используют отдельные маслоотбойники, прикрепленные к выхлопному отверстию в корпусе насоса.

При впускных давлениях 10^4 — 10^2 Па работа насосов сопровождается образованием заметных количеств так называемого масляного тумана, который выходит из насоса в виде сизо-белого дыма. В насосах с быстротой действия до 5 л/с для задержания масляного тумана могут быть использованы простые фильтры, например бумажные, из стекловаты или керамические. Однако эти фильтры нуждаются в периодической замене (бумажные) или промывке (керамические), а также затрудняют эксплуатацию насосов, откачивающих пары воды. Поэтому лучшим способом защитить производственное помещение от поступления масляного тумана является подключение выхлопа насоса к выхлопной коммуникации с помощью дюритового шланга или металлической трубы.

Газобалластное устройство и откачка конденсирующихся паров

Проведение многих вакуумных технологических процессов (сушка, пропитка, дистилляция) сопровождается выделением значительных количеств конденсирующихся паров, откачка которых обычным насосом с масляным уплотнением еще 40—50 лет тому назад была очень трудной задачей. Рассмотрим рис. 7.7, на котором в логарифмическом масштабе показано изменение давления газа и паров в камере насоса по мере увеличения степени сжатия

$$\varepsilon = V_{\text{вс}} / V_{\text{сж}},$$

где $V_{\text{вс}}$ — объем рабочей камеры насоса в момент конца всасывания;

$V_{\text{сж}}$ — объем рабочей камеры в момент на конец сжатия при давлении $p_{\text{вып}} = 1,2 \cdot 10^5$ Па, когда открывается выхлопной клапан.

Пусть давление во впускном сечении насоса составляет $1,33 \times 10^2$ Па.

При сжатии газа давление возрастает до $p_{\text{вып}}$, клапан открывается и газ выталкивается из насоса (линия 1-2-3).

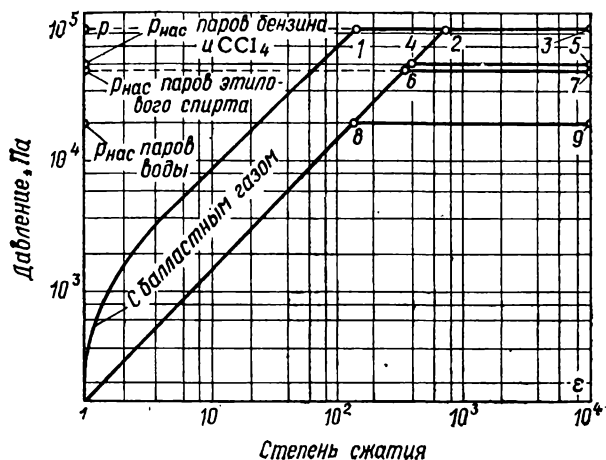


Рис. 7.7. Возрастание давления в камере насоса в зависимости от рода откачиваемого газообразного вещества.

Иначе обстоит дело при откачке конденсирующихся паров, которые не могут быть сжаты до давления, превышающего давление насыщения $p_{\text{нас}}$ (рис. 7.8), при данной температуре, так как дальнейшее сжатие приводит не к росту давления, а к конденсации некоторого количества паров, и давление в камере насоса остается постоянным, не достигая значения $p_{\text{вып}}$. Этот процесс показан линиями 1-6-7, 1-4-5 и 1-8-9 на рис. 7.7 (рабочая температура в камере принята 333 К).

При конденсации в камере насоса выхлопной клапан открывается вследствие резкого гидравлического удара конденсата и масла о пластину клапана. Конденсат смешивается с маслом и ухудшает его свойства. Попавший в масло конденсат вновь испаряется в камере насоса и увеличивает полное остаточное давление.

Давление насыщения большинства встречаемых в практике паров при комнатной температуре лежит выше $1,33 \cdot 10^3$ Па, т. е. практически может быть достигнуто только в насосах с масляным уплотнением, имеющих выпускное давление, равное атмосферному; в других насосах (двухроторных, турбомолекулярных, струйных), не работающих против атмосферного давления, эти пары не конденсируются.

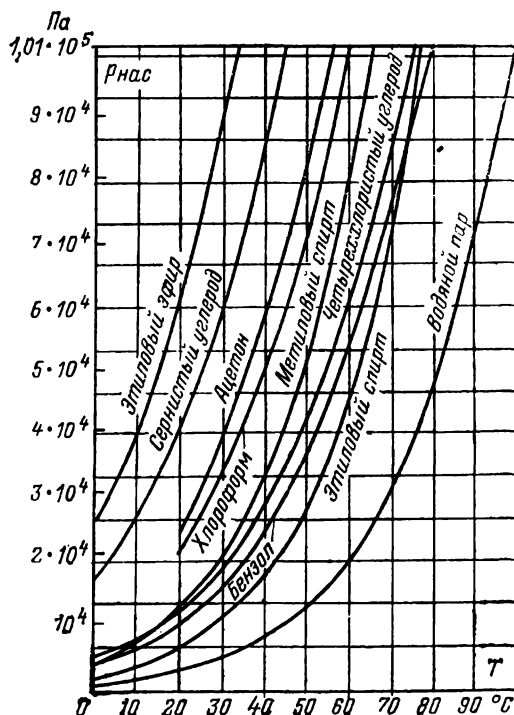


Рис. 7.8. Зависимости давления насыщенных паров от температуры для некоторых веществ.

Наиболее часто встречается необходимость в откачке паров воды. Вода, попавшая в масло, помимо образования трудноразделимой эмульсии масло — вода, вызывает целый ряд химических взаимодействий, ведущих к ухудшению смазывания, перегреву и осмолению насоса, не говоря уже о повышении предельного остаточного давления и коррозии отдельных деталей насоса.

Эффективным способом предотвращения конденсации паров в насосе является напуск так называемого *балластного газа* в камеру насоса в добавление к поступившему в нее пару после отделения камеры от выпускного патрубка насоса. В качестве балластного газа обычно используется атмосферный воздух, поступающий в камеру через отдельное отверстие с обратным клапаном и связанное с краном-дозатором трубкой или отверстием в корпусе. Устройство для напуска балластного газа называют *газобалластным*, насос с таким устройством — *газобалластным насосом*. Практически все насосы выпускаются сейчас с газобалластным устройством.

В камере газобалластного насоса сжимается смесь паров с балластным газом, причем количество балластного газа определяется из условия, чтобы к моменту достижения смесью давления выхлопа парциальное давление паров не достигало давления насыщения, т. е. чтобы выполнялись условия

$$p_6 + (p_r + p_n) \frac{V_{вс}}{V_{сж}} \geq p_{вып}; \quad p_n \frac{V_{вс}}{V_{сж}} \leq p_{нас}, \quad (7.1)$$

где p_6 — давление сжатого балластного газа;

p_r — давление газа во входном сечении насоса;

p_n — давление пара во входном сечении насоса;

$p_{нас}$ — давление насыщенного пара при рабочей температуре насоса;

$p_{вып}$ — выпускное давление насоса;

$V_{вс}$ — объем рабочей камеры в момент «конец всасывания»;

$V_{сж}$ — объем рабочей камеры в момент «конец сжатия».

Условие (7.1) справедливо при *изотермическом* процессе сжатия в насосе, что не совсем строго для реального насоса, но позволяет легко определить поток балластного газа Q'_6 , необходимый для предотвращения конденсации:

$$Q'_6 \geq S_n \left(p_{вып} \frac{p_n}{p_{нас}} - p_r - p_n \right) = S_n p_n \left[\left(\frac{p_{вып}}{p_{нас}} - 1 \right) - \frac{p_r}{p_n} \right], \quad (7.2)$$

где S_n — быстрота действия насоса.

В случае откачки только конденсируемых паров ($p_r \approx 0$) формула (7.2) упрощается:

$$Q'_6 \geq S_n p_n \left(\frac{p_{\text{вып}}}{p_{\text{нас}}} - 1 \right). \quad (7.3)$$

Уравнение (7.2) показывает, что поток балластного газа Q'_6 должен быть тем больше, чем больше быстрота действия S_n насоса, давление пара p_n во входном сечении и чем меньше давление насыщенных паров (т. е. температура масла в насосе). Отметим, что если давление насыщенных паров $p_{\text{нас}}$ численно равно выпускному давлению $p_{\text{вып}}$, насос не требует балластного газа для предотвращения конденсации. Например, насос со специальным маслом, работающий при температуре примерно 380 К, способен откачивать пары воды без напуска балластного газа.

Допустимое давление паров воды на входе является паспортной характеристикой газобалластного насоса.

Другой важной характеристикой газобалластного насоса является количество (масса) паров, которое он откачивает в единицу времени при заданном давлении паров на входе, т. е. массовая производительность M'_n насоса по откачиваемому пару. Ее легко подсчитать, представив уравнение состояния (1.14) для откачиваемой в единицу времени порции пара в виде

$$p_n S_n = \frac{M'_n}{M} R_0 T, \quad (7.4)$$

откуда следует:

$$M'_n = \frac{M S_n p_n}{R_0 T} \text{ г/с} = \frac{3,6 M S_n p_n}{R_0 T} \text{ кг/ч}, \quad (7.5)$$

где M — молекулярная масса пара;

S_n — быстрота действия насоса, л/с;

p_n — давление пара на впуске, Па;

$R_0 = 8,3 \cdot 10^3 \text{ Дж/(К} \cdot \text{кмоль)}$ — универсальная газовая постоянная;

T — температура пара, К.

Для паров воды ($M=18$) при $T=293 \text{ К}$ массовая производительность насоса определяется формулой, кг/ч:

$$M'_n = 2,67 \cdot 10^{-5} S_n p_n. \quad (7.6)$$

Формулы (7.5) и (7.6) справедливы, конечно, только в том случае, если масло при откачке не загрязняется конденсатом, т. е. предельное остаточное давление

насоса по откачиваемым парам $p_{\text{п.ост}}=0$. В противном случае, если масло загрязняется конденсатом (например, из-за недостаточной подачи балластного газа или из-за сродства откачиваемых паров и масла, когда пары растворяются в масле), предельное остаточное давление насоса по откачиваемым парам $p_{\text{п.ост}} \neq 0$ и наблюдается уменьшение массовой производительности насоса по парам, что может быть учтено, если в формулы (7.1), (7.5) и (7.6) вместо $p_{\text{п}}$ представить $(p_{\text{п}} - p_{\text{п.ост}})$.

Следует иметь в виду, что газобалластные насосы весьма эффективны при откачке паров воды, но при откачке паров, растворяющихся в масле из паровой фазы (например, пары бензина, бензола), их эффективность снижается, о чем можно судить по снижению массовой производительности в сравнении с расчетным значением.

Пример 7.1. Определить допустимое давление паров воды для газобалластного насоса с быстротой действия 6 л/с при потоке балластного газа $Q'_6=40$ м³·Па/с, выпускном давлении $p_{\text{вып}}=1,2 \cdot 10^5$ Па и температурах масла 60, 70 и 80°C.

По данным рис. 7.8 находим давление насыщенных паров при указанных температурах $p_{60}=2 \cdot 10^4$ Па, $p_{70}=3,2 \cdot 10^4$ Па, $p_{80}=4,8 \cdot 10^4$ Па и по формуле (7.3) находим допустимые давления паров воды $p_{\text{п.доп}}$ соответственно $1,33 \cdot 10^3$; $2,42 \cdot 10^3$ и $4,45 \cdot 10^3$ Па.

Пример 7.2. Определить наибольшую допустимую производительность по парам воды насоса с быстротой действия 6 л/с, $Q'_6=40$ м³·Па/с, $p_{\text{вып}}=1,2 \cdot 10^5$ Па, температура масла 60°C. Из предыдущего решения допустимое давление паров воды в этих условиях составляет $p_{\text{п.доп}}=1,33 \cdot 10^3$ Па. По формуле (7.6) $M'_{\text{п}}=0,213$ кг/ч.

Поток балластного газа может регулироваться с помощью крана-дозатора. В двухступенчатых насосах напуск балластного газа, как правило, производится только в выхлопную ступень, так как в первой высоковакуумной ступени сжатия или не происходит, или оно недостаточно для конденсации паров.

Ввиду того, что балластный газ все же перетекает через механизм насоса на сторону всасывания, предельное остаточное давление одноступенчатых насосов увеличивается примерно до 10^2 Па. Предельное остаточное давление двухступенчатых насосов при работе с балластным газом увеличивается до 1—10 Па в зависимости от конструкции и степени износа механизма.

При работе газобалластного насоса из выпускного патрубка выходит парогазовая смесь, содержащая на-

сыщенные пары при температуре насоса 333 К и выше. По мере движения по выпускному трубопроводу, стенки которого имеют комнатную температуру, пар конденсируется на них и конденсат может стекать обратно в насос, особенно если выпускной трубопровод имеет длинные вертикальные участки. В таких случаях в трубопроводе около насоса размещают отделитель конденсата, устройство и действие которого понятны из рис. 7.9. Если пары, выделяющиеся в откачиваемом сосуде, имеют высокую температуру и могут конденсироваться на стенках впускного трубопровода, на входе насоса должен быть установлен отделитель конденсата аналогичной конструкции, так как попадание, например, капель воды приводит к образованию эмульсии в механизме насоса.

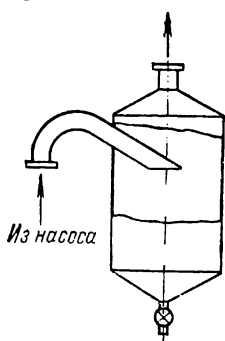


Рис. 7.9. Принципиальная схема устройства для отделения конденсата на выпускном патрубке газобалластного насоса.

При очень высоком впускном давлении паров (свыше $4 \cdot 10^3$ — $5,3 \cdot 10^3$ Па) используются водоохлаждаемые конденсаторы. Давление паров на выходе конденсатора не превышает допустимого значения для газобалластного насоса.

Во избежание конденсации паров в камере самого насоса корпус должен быть прогрет до рабочей температуры масла перед началом откачки паров. Для этого насос включают примерно за час до начала откачки и при закрытом впускном патрубке дают работать с полным напуском балластного газа.

Практические указания по эксплуатации

К каждому насосу прилагается достаточно подробная инструкция по эксплуатации, однако ввиду широкого применения насосов с масляным уплотнением полезно запомнить несколько общих правил их эксплуатации.

Небольшие насосы с быстротой действия до 3—5 л/с часто не закрепляются на фундаменте, а устанавливаются прямо на полу. При этом рекомендуется ставить насос в неглубокий металлический противень (на случай течи масла) и подложить под него резиновый лист

для уменьшения шума. Металлическая цельнотянутая труба в качестве вакуумной коммуникации всегда предпочтительней резинового шланга, так как вследствие газовой выделения резины может быть затруднено получение низких давлений. Между насосом и откачиваемым сосудом должен быть предусмотрен компенсатор вибрации, в качестве которого может быть использован кусок вакуумного резинового шланга. При использовании коротких кусков резинового шланга для соединения металлических труб следует насколько возможно сближать торцы труб.

Средние и крупные насосы обычно устанавливаются на фундаменте, впускной патрубок соединяется с магистралью откачки с помощью сильфона или другого гибкого элемента для компенсации вибраций. Перед присоединением к вакуумной системе полезно проверить создаваемое насосом полное остаточное давление при работе «на себя», т. е. с заглушкой на впускном патрубке, к которой присоединен манометрический преобразователь.

Попадание твердых предметов в рабочую камеру приводит к поломке насоса, поэтому входной патрубок насоса, отсоединенного от вакуумной системы, должен быть тщательно закрыт.

Особое внимание при эксплуатации должно быть обращено на сохранение качества и количества залитого в насос масла. Не следует без особой необходимости допускать работу насоса при высоких впускных давлениях во время откачки сосуда от атмосферного давления, так как это может привести к уносу капель масла с выхлопными газами; поэтому желательно дросселировать поток газа, не полностью открывая кран на входе насоса.

Если насос не обеспечивает необходимого предельного остаточного давления, причины этого должны отыскиваться и устраняться в следующем порядке:

1) недостаток масла в насосе — следует долить масло;

2) плохое качество масла или его загрязнение конденсатом — можно попытаться очистить масло, включив подачу балластного газа при работе насоса с закрытым впускным патрубком. Если в течение 15—20 мин предельное остаточное давление не уменьшается, следует сменить масло;

3) загрязнение, коррозия или поломка клапанов — необходимо вскрыть клапанную коробку и устранить неисправности;

4) загрязнение каналов для подвода масла в камеру насоса — устранение этого дефекта связано обычно с переборкой насоса;

5) износ, нарушение нормальной работы или поломка деталей — устранение таких неисправностей также связано с полной или частичной переборкой насоса.

7.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ С ДЕФОРМИРУЕМОЙ КАМЕРОЙ

Принцип действия

Как уже отмечалось, существенным недостатком механических вакуумных насосов с масляным уплотнением является проникновение паров масла и продуктов его крекинга в откачиваемый сосуд.

Для создания так называемого *чистого вакуума* были разработаны механические насосы с деформируемой рабочей камерой.

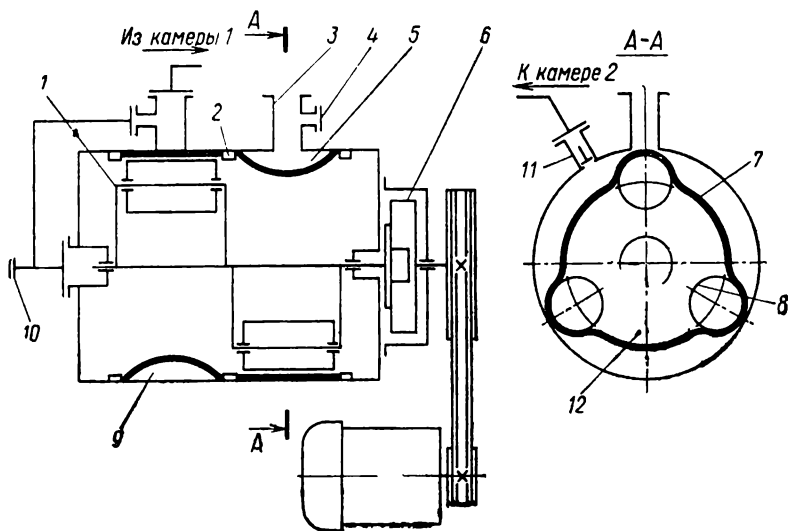


Рис. 7.10. Схема механического вакуумного насоса с деформируемой камерой.

1 — турникет; 2 — прижимное кольцо; 3 — впускное отверстие; 4 — патрубок для манометрического преобразователя; 5, 9 — рабочие камеры; 6 — привод; 7 — эластичная камера; 8 — ролик; 10 — патрубок для крана напуска атмосферы; 11 — выпускной клапан; 12 — собственный объем насоса.

На рис. 7.10 показана схема насоса, принцип действия которого основан на последовательном циклическом изменении объема эластичной камеры 7 при ее деформации роликами 8. При вращении турникета 1 с тремя роликами 8 по часовой стрелке происходит всасывание газа и перенос его к выпускному клапану 11, где газ выбрасывается в атмосферу.

При работе насоса в эластичной камере периодически создается разрежение. С тем, чтобы исключить сжатие камеры атмосферным давлением, в полости 12 насоса создается разрежение. Для этого в корпусе насоса эластичная камера закреплена двумя кольцами 2 таким образом, чтобы образовались две рабочие камеры 5 и 9, причем камера 5 предназначена для откачки рабочего сосуда, а камера 9 — для откачки внутренней полости 12 самого насоса. Камеры 5 и 9 соединены последовательно друг с другом. В каждой рабочей камере установлен свой турникет 1 с тремя роликами.

Существенным недостатком насоса является малый межремонтный период (500—1000 ч) из-за недостаточной прочности и износостойкости деформируемой камеры, которая изготавливается обычно из пластика типа полиуретана.

Практические указания по эксплуатации

При аварийном прорыве атмосферы или при заклинивании выпускного клапана 11 эластичная камера 7 может чрезмерно раздуться, что приведет к быстрому выходу ее из строя. Поэтому нельзя начинать откачку сосуда, находящегося при атмосферном давлении, если в насосе уже достигнуто предельное остаточное давление или если насос работает только на откачку собственного объема.

Давление в откачиваемом сосуде не должно превышать давление в собственном объеме насоса более чем на $5 \cdot 10^3$ Па. При длительной работе насоса, особенно при давлении более 1000 Па, из-за разогрева заметно снижаются прочностные характеристики материала гибкой камеры и увеличивается износ, уменьшающий ресурс работы насоса.

Насосы этого типа не имеют газобалластного устройства. Поэтому при откачке конденсирующихся паров и газов в выпускном патрубке насоса скапливается конденсат, который не только увеличивает предельное оста-

точное давление, но и нарушает работу насоса. Предельное остаточное давление насосов с деформируемой камерой составляет обычно 10^{-1} Па и определяется главным образом парами воды.

Большую опасность для работы насоса представляет попадание внутрь эластичной камеры посторонних твердых частиц. При наличии такой опасности во входном патрубке насоса должна быть установлена сетка с размерами ячейки 1×1 мм.

7.4. ДВУХРОТОРНЫЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия

Двухроторные вакуумные насосы, работающие по принципу давно известной воздушной помпы Рутса, широко используются в области среднего вакуума. Схема двухроторного вакуумного насоса показана на рис. 7.11.

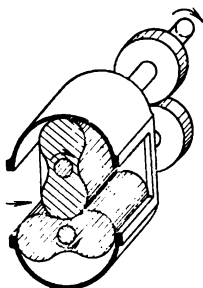


Рис. 7.11. Схема двухроторного вакуумного насоса.

В рабочей камере насоса расположены два ротора, напоминающие в сечении цифру 8, синхронно вращающиеся навстречу друг другу. Синхронность вращения обеспечивается с помощью закрепленных на валах роторов шестерен связи, вынесенных за пределы рабочей камеры. Во время работы роторы не касаются друг друга и стенок рабочей камеры, что достигается благодаря их точному профилированию и регулировке зазоров при сборке. Основными достоинствами двухроторных насосов являются отсутствие трения в роторном механизме, простота устройства и возможность хорошей динамической балансировки роторов, в связи с чем достигаются большие скорости вращения и высокая быстрота действия насосов при сравнительно малых габаритах и массе.

На рис. 7.12 показан ряд последовательных положений роторов при работе, что помогает понять процесс передачи газа со стороны впуска (слева) на сторону выпуска (направо). Нетрудно видеть, что газ передается постоянными объемами, заключенными между корпусом и впадинами роторов (в положениях *a* и *д* —

нижнего, в положении *в* — верхнего ротора, положения «б» и *г* — промежуточные). Быстрота действия двухроторного насоса определяется объемом, удаляемым впадинами обоих роторов в единицу времени, с учетом обратного перетекания газа с выхода на вход через зазо-

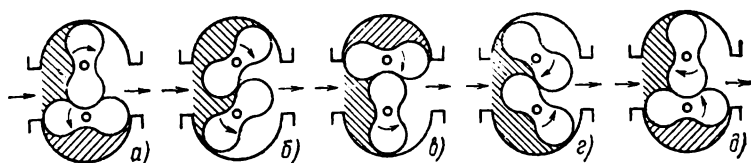


Рис. 7.12. Последовательные положения роторов при работе.

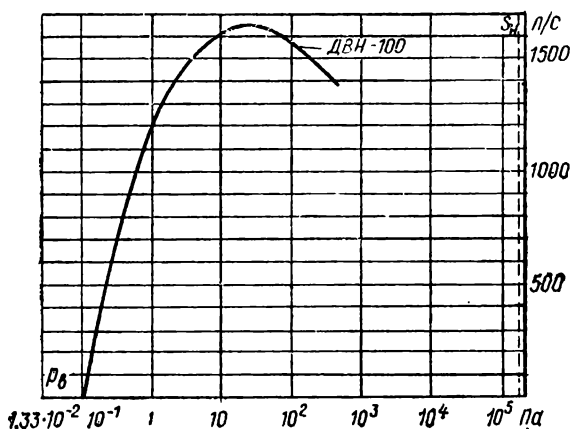


Рис. 7.13. Зависимость быстроты действия двухроторного вакуумного насоса от впускного давления.

ры в роторном механизме. Эти зазоры сравнительно велики (даже у самых маленьких насосов зазоры немногим меньше 0,1 мм), и если бы двухроторные насосы работали с выхлопом в атмосферу, их предельное остаточное давление составляло бы около 10^4 Па. Поэтому двухроторные насосы имеют на выхлопе форвакуумный насос (чаще всего механический вакуумный насос с масляным уплотнением), иначе они не способны создать низкие давления.

Характерная зависимость быстроты действия двухроторного вакуумного насоса от впускного давления показана на рис. 7.13.

Конструкция и характеристики

Быстрота действия двухроторного насоса тем больше, чем меньше отношение $p_{\text{вып}}/p_{\text{н}}$ (сжатие), т. е. чем больше быстрота действия $S_{\text{н}}$ форвакуумного насоса при неизменном потоке газа.

В двухроторном насосе газ передается со входа на выход порциями постоянного объема, т. е. объем камеры при этом не уменьшается. Сжатие передаваемого газа происходит практически мгновенно от давления $p_{\text{н}}$ до давления $p_{\text{вып}}$ при сообщении полости, передающей газ, со стороной выпуска двухроторного насоса (рис. 7.12, верхняя полость), так как в нее устремляется газ со стороны выпуска. Поэтому затрачиваемая двухроторным насосом на выталкивание газа мощность относительно больше, чем она была бы у механического вакуумного насоса с масляным уплотнением, работающего при таких же условиях. Однако этот недостаток при работе в области низких давлений 10^3 — 10^{-1} Па не существен, так как абсолютное значение этой мощности очень мало. Потери мощности в приводе, подшипниках и шестернях связи также невелики, а трение в роторном механизме отсутствует, поэтому у двухроторных насосов в области давлений менее $6,5 \cdot 10^2$ Па потребление мощности на единицу быстроты действия (удельная мощность) значительно меньше, чем у насосов с масляным уплотнением.

Двухроторные вакуумные насосы часто объединяют в агрегаты с механическими вакуумными насосами, предназначенными для предварительного разрежения. В качестве примера на рис. 7.14 приведен агрегат, состоящий из последовательно соединенного двухроторного насоса с механическим вакуумным насосом. Привод обоих насосов осуществляется от одного электродвигателя.

Применение двухроторных вакуумных насосов особенно целесообразно в системах централизованного форвакуума, при откачке установок обезгаживания и сушки деталей, в которых наблюдаются значительные

газовыделения. **Двухроторные вакуумные насосы** выгодно применять для откачки электровакуумных приборов, не требующих давления, меньшего $5 \cdot 10^{-2}$ Па.

Состав остаточных газов двухроторных насосов такой же, как и у механических вакуумных насосов с масляным уплотнением, т. е., несмотря на отсутствие смазки в роторном механизме, двухроторные насосы не обеспечивают безмасляного вакуума, так как из-за малых значений наибольшего сжатия (не более 100) пары масла поступают на вход со стороны форвакуума из камеры шестерен связи и их подшипников.

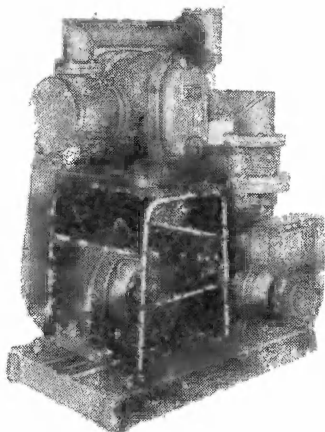


Рис. 7.14. Агрегат, состоящий из механического вакуумного и двухроторного насосов.

Практические указания по эксплуатации

При эксплуатации двухроторных насосов необходимо периодически контролировать уровень масла в полостях под торцевыми крышками (через смотровые окна), отсутствие течей масла из ввода вращения и исправность механизма насоса (отсутствие подозрительных шумов и стуков при запуске, работе и остановке). Недостижение паспортного предельного остаточного давления обычно связано с течью в системе или во фланцах или с неисправностью форвакуумного насоса, так как течи в двухроторных насосах возникают очень редко (обычно в результате неудачной переборки насоса), а небольшие случайные задиры роторов мало сказываются на предельном остаточном давлении.

7.5. ЭЖЕКТОРНЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия

Принцип действия эжекторных насосов состоит в следующем.

Рабочее тело (газ, пар или вода), имеющее повышенное давление, поступает в сопло 1 (рис. 7.15), где потенциальная энергия сжатого рабочего тела преобразуется в кинетическую энергию струи. Струя, получившая высокую скорость и имеющая низкое статическое давление, на выходе из сопла попадает в камеру смешения 2.

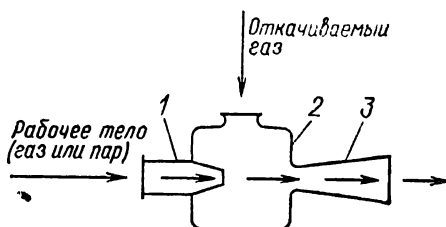


Рис. 7.15. Эжекторное сопло.

В камере смешения откачиваемый газ увлекается рабочим телом и интенсивно смешивается с ним. Эта смесь, обладающая несколько меньшей, но все еще значительной скоростью, попадает в диффузор 3, в котором сжимается за счет перехода кинетической энергии струи в потенциальную энергию давления.

На место удаляющейся из камеры смешения смеси поступают все новые порции газа, которые в свою очередь также смешиваются и увлекаются рабочим телом.

На выходе из диффузора давление смеси будет меньше давления рабочего тела на входе в сопло, но значительно выше давления откачиваемого газа в камере смешения.

Эжекторные насосы работают в области давлений от атмосферного до 1 Па и могут применяться в вакуумных системах в качестве самостоятельных насосов или насосов предварительного разрежения.

Конструкции и характеристики

Водоструйные насосы предназначены для откачки воздуха и других газов от атмосферного давления до 100 Па.

На рис. 7.16 показана одна из конструкций водоструйного насоса. Работа насоса основана на использовании откачивающего действия струи воды, которая под давлением $2,5 \cdot 10^5$ Па истекает из сопла 1. Откачи-

ваемый газ в сфере действия струи перемешивается с нею, и смесь воды с газом попадает затем в цилиндрическую камеру 2, за которой установлен расширяющийся диффузор. В диффузоре статическое давление смеси воды и газа за счет уменьшения скорости повышается до атмосферного давления. Смесь воды с газом стекает в бачок 3, откуда сливается в дренажную линию, присоединенную к патрубку 4. Для выхода газа из бачка во фланце 5 предусмотрено отверстие. Насос присоединяется к вакуумной системе через кран 8. Резервуар 7 предназначен для приема воды, засасываемой через диффузор из бачка в случае аварийного прекращения ее подачи. Через кран 6 подается воздух в резервуар при остановке насоса, что также предотвращает всасывание воды.

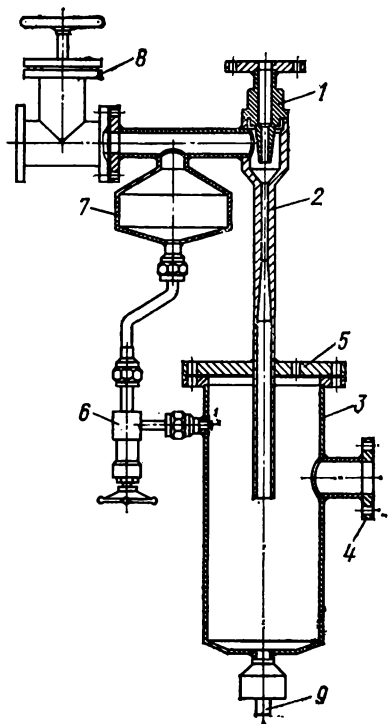


Рис. 7.16. Водоструйный насос.

Производительность насоса возрастает с повышением давления воды. Предельное остаточное давление насоса практически равно упругости пара воды и увеличивается с повышением ее температуры.

Водоструйные насосы часто применяются в системах безмасляной откачки, например в системе предварительного разрежения высоковакуумного парорутного насоса, для сорбционного насоса, а также в качестве последней ступени парожеткторного насоса.

Пароэжекторные насосы предназначены для безмасляной откачки больших сосудов до давлений $1-10^{-1}$ Па. На рис. 7.17 показана принципиальная схема четырехступенчатого парожеткторного насоса, состоящего из трех пароструйных ступеней 1, 2 и 3 и одной

водоструйной ступени 4, работающей с выхлопом в атмосферу. Как правило, в высокопроизводительных многоступенчатых эжекторных насосах за каждой пароструйной ступенью устанавливаются конденсаторы, в которых пар конденсируется, а газ откачивается последующей ступенью.

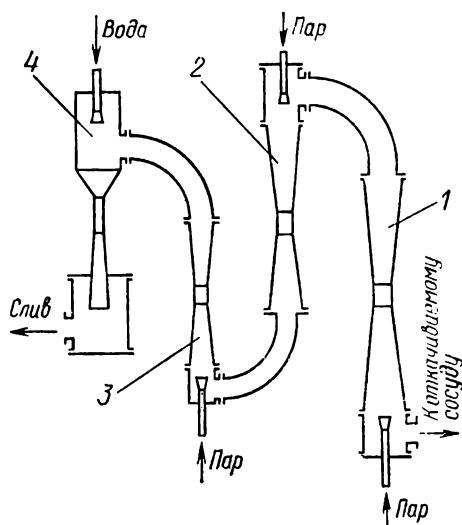


Рис. 7.17. Принципиальная схема многоступенчатого пароежекторного насоса.

1 — первая пароструйная ступень; 2 — вторая пароструйная ступень; 3 — третья пароструйная ступень; 4 — водоструйная ступень.

В малых насосах ввиду небольшого расхода пара по сравнению с высокопроизводительными насосами в пароструйных ступенях насоса можно обойтись без промежуточных конденсаторов, что позволяет упростить конструкцию и уменьшить габариты насоса, хотя и влечет за собой несколько повышенный расход пара. В насосе, показанном на рис. 7.17, отсутствуют промежуточные конденсаторы. Пар под давлением $4 \cdot 10^5$ Па подводится к соплам пароструйных ступеней 1, 2 и 3. При этом каждая последующая пароструйная ступень откачивает не только газ, но и весь рабочий пар, поступивший из предыдущей ступени. Последняя пароструйная ступень 3 откачивается водоструйной ступенью 4, к ко-

торой подается вода также под давлением $4 \cdot 10^5$ Па. Пройдя через сопло водоструйной ступени, вода поступает в расширительный бак, где гасится скорость водяного потока, и сливается в дренажную трубу.

7.6. СТРУЙНЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия

Принципиальная схема струйного насоса, работа которого основана на откачивающем действии паровой струи, показана на рис. 7.18.

Источником пара является рабочая жидкость (ртуть или вакуумное масло), залитая в кипятильник 2, которая нагревается до рабочей температуры нагревателем 1. Образующийся при нагреве пар по пароподводящей трубе 3 поступает в сопло 5, из которого с большой скоростью истекает в пространство рабочей камеры 6. Откачиваемый газ, поступающий через впускной патрубок 9, захватывается в рабочей камере струей и увлекается ею к охлажденным стенкам рабочей камеры, где пар конденсируется и конденсат по сливной трубке 8 возвращается в кипятильник, а газ, сжатый струей, выбрасывается через выпускной патрубок 10 и откачивается форвакуумным насосом.

Механизм увлечения газа паровой струей в паро-струйных насосах поясняется рис. 7.19. Как уже отмечалось, в эжекторных насосах при высоком давлении и откачиваемого газа (10^5 — 10 Па) пар в струе на выходе из сопла должен иметь высокую плотность, чтобы при взаимодействии с откачиваемым газом струя не разрушалась.

В струйных насосах, откачивающих газ с давлением

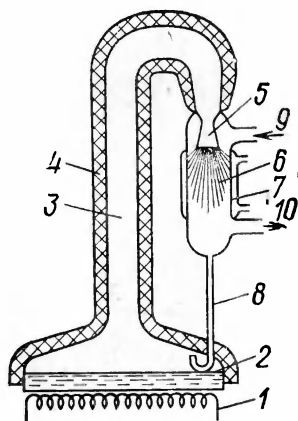


Рис. 7.18. Принципиальная схема струйного вакуумного насоса.

1 — нагреватель; 2 — кипятильник с рабочей жидкостью; 3 — пароподводящая труба; 4 — теплоизоляция; 5 — сопло; 6 — рабочая камера насоса; 7 — холодильник; 8 — трубка для стока конденсата в кипятильник; 9 — впускной патрубок; 10 — выпускной патрубок.

$10-10^{-1}$ Па, струя не разрушается при меньшей плотности пара в ней. В данном случае увлечение откачиваемого газа струей пара происходит в результате трения между поверхностью струи пара и прилегающими к ней слоями газа (*вязкостный захват*), а также вследствие частичной *диффузии* молекул газа в приповерхностную часть струи (зона струи, ограниченная пункти-

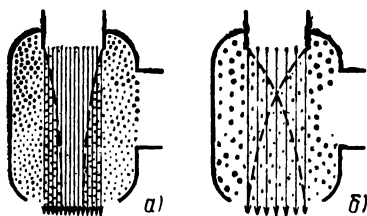


Рис. 7.19. Способы увлечения газа паровой струей в пароструйных насосах.

а — диффузия газа в плотную струю с вязкостным захватом в бустерных насосах при давлении газа $10-10^{-1}$ Па; *б* — диффузия молекул газа в струю малой плотности в диффузионных насосах при давлении газа около 10^{-2} Па.

ром на рис. 17.19,а). Подобный механизм увлечения откачиваемого газа паровой струей используется в бустерных насосах.

При более низком давлении откачиваемого газа плотность струи пара может быть еще меньше, так как в механизме увлечения газа струей наряду с вязкостным захватом все *большую роль начинает играть диффузия газа* в струю.

Наконец, при давлении откачиваемого газа меньше 10^{-2} Па, когда длина свободного пути его молекул становится соизмеримой с размерами рабочей камеры насоса, роль вязкостного захвата газа становится малой, и механизм увлечения газа *целиком определяется диффузией молекул газа в струю* (рис. 7.19,б). В этих условиях молекулы в результате столкновений с частицами пара получают составляющую скорости в направлении движения струи. Подобный механизм увлечения откачиваемого газа паровой струей используется в высоковакуумных диффузионных насосах.

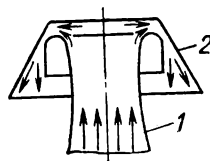
Конструкции и характеристики

Бустерные (вспомогательные) насосы обладают наибольшей быстротой действия в диапазоне давлений $10-10^{-1}$ Па и применяются совместно с механическими вакуумными насосами с масляным уплотнением, быстрота действия которых в этом диапазоне давлений

лений практически близка к нулю. В бустерных насосах обеспечивается повышенная плотность струи масляного пара за счет применения легколетучих сортов вакуумного масла, увеличения мощности подогревателей и использования обращенных сопл зонтичного типа (рис. 7.20). Последняя ступень бустерных насосов часто выполняется в виде эжекторного сопла с диффузором, чтобы обеспечить высокое выпускное давление.

Рис. 7.20. Схема обращенного сопла зонтичного типа.

1 — подсопельник; 2 — зонт сопла, стрелками указано направление движения струи пара.



На рис. 7.21 показана зависимость быстроты действия бустерного насоса от впускного давления.

Диффузионные насосы предназначены для работы в области высокого и сверхвысокого вакуума, т. е. при давлениях ниже 10^{-1} Па. Отличительной особенностью характеристики диффузионных насосов является постоянство быстроты действия в рабочем диапазоне давлений. Конструктивно диффузионные насосы схожи с бустерными. Однако их выпускное давление обычно на порядок ниже, чем у бустерных, и составляет 10—40 Па. Диффузионные насосы обычно работают при меньших давлениях пара в кипятильнике и требуют относительно меньшую мощность нагревателя.

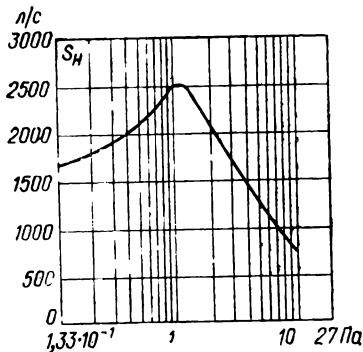


Рис. 7.21. Зависимость быстроты действия бустерного насоса от впускного давления.

Конструкции паромасляных диффузионных насосов имеют ряд особенностей, связанных с использованием в качестве рабочих жидкостей масла или сложных эфиров (см. § 17.4). Это прежде всего устройства, обеспечивающие *фракционирование* (т. е. разделение на фракции) неоднородных масел, причем тяжелые фракции (с низким давлением насыщенного пара) направляются в сопло первой (высоковакуумной) ступени, чем обес-

печиваются низкое предельное остаточное давление и высокое быстродействие насоса в целом, а легкие фракции (с высоким давлением насыщенного пара) направляются в сопло последней ступени, обеспечивая высокое выпускное давление. Насосы с таким устройством называются *фракционирующими* или *разгоночными*. На рис. 7.22,а показано устройство металлического высоко-

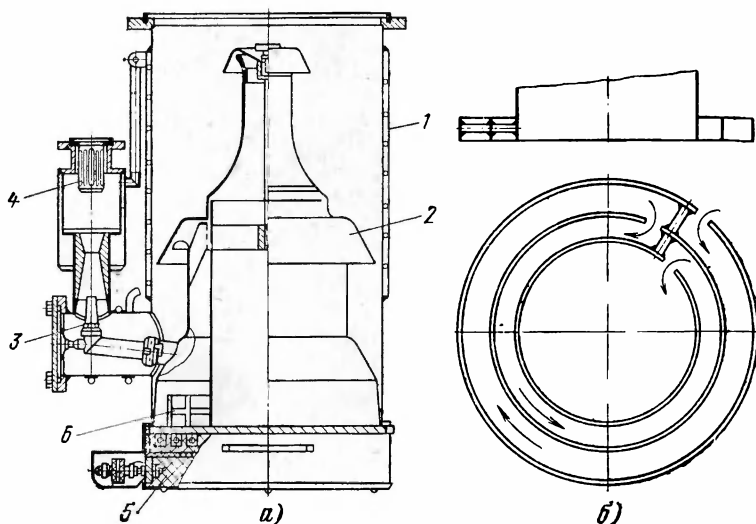


Рис. 7.22. Высоковакуумный диффузионный насос (а) и устройство для фракционирования масла (б).

1 — корпус; 2 — паропровод; 3 — эжекторное сопло; 4 — ловушка для паров масла; 5 — электронагреватель; 6 — лабиринтные кольца.

вакуумного фракционирующего диффузионного насоса. Сварной корпус 1 насоса выполнен из малоуглеродистой стали с наваренной на него рубашкой водяного охлаждения. Паропровод 2 с двумя зонтичными соплами изготовлен из алюминия. Последней выходной ступенью насоса является эжектор 3.

Фракционирование масла, стекающего в кипятильник с периферии по стенке корпуса, осуществляется с помощью лабиринтных колец, удлиняющих путь масла (рис. 7.22,б) до поступления в центральную зону кипятильника, откуда питается паром высоковакуумное сопло, так что легкие фракции масла успевают испариться

на периферии кипятильника, откуда они поступают во второе зонтичное и эжекторное сопла насоса.

В непрогреваемых вакуумных системах с резиновыми уплотнителями паромасляные диффузионные насосы обеспечивают предельное остаточное давление около $5 \cdot 10^{-4}$ Па без ловушек и около $5 \cdot 10^{-5}$ Па с ловушками, охлаждаемыми кипящим жидким азотом. Характерная

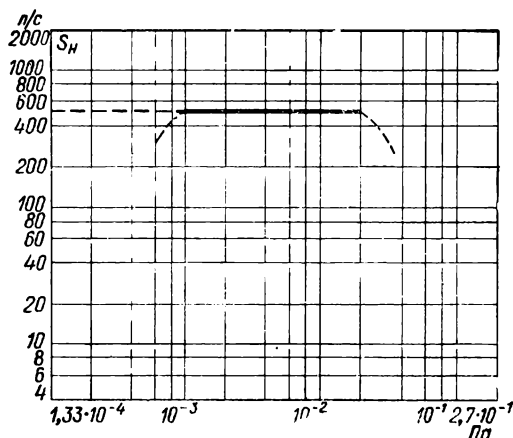


Рис. 7.23. Зависимость быстроты действия паромасляного диффузионного насоса от впускного давления.

зависимость быстроты действия диффузионного насоса ($S_n = 500$ л/с) от впускного давления приведена на рис. 7.23.

Предельное остаточное давление пароструйного диффузионного насоса в значительной мере определяется качеством фракционирования масла и содержанием газов в масле, стекающем в кипятильник, так как чем лучше обезгажено масло, тем меньше газов заносится паровой струей на впуск насоса. Лабиринтные кольца, показанные на рис. 7.22, б, не прилегают плотно к днищу кипятильника, в связи с чем не обеспечивают достаточного полного фракционирования масла. Для улучшения фракционирования масла в современных насосах лабиринтные кольца выполняют непосредственно в днище кипятильника, а паропроводящие трубы сопел плотно надеваются на перегородки соответствующих каналов лабиринтных колец. Обезгаживание масла в насосах улучшено тем, что нижняя часть корпуса не охлажда-

ется (для этого водяную рубашку укорачивают), так что температура масла в нижней части достигает 140°C , а также благодаря удлинению пути конденсата в горячей зоне, для чего на стенке корпуса ниже выпускного патрубка предусмотрена винтовая канавка, по которой конденсат стекает в кипятильник (рис. 7.24).

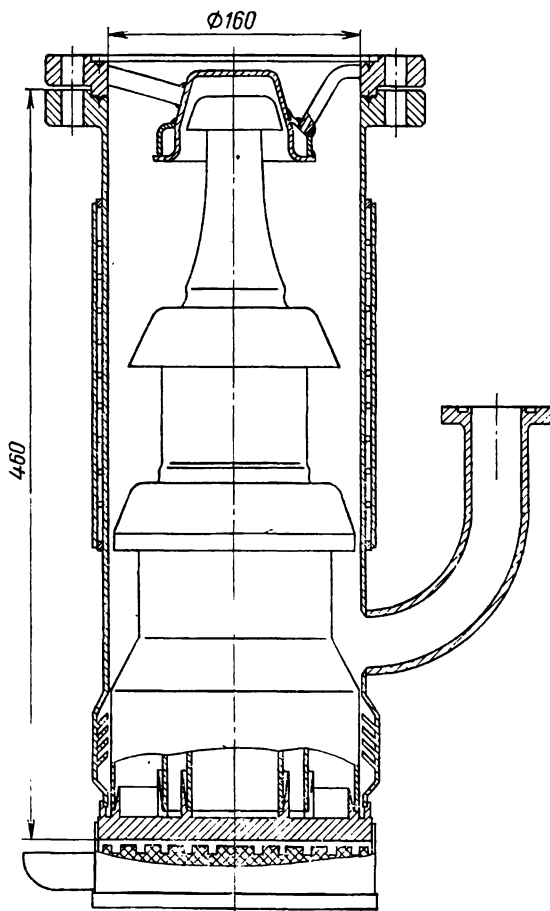


Рис. 7.24. Сверхвысоковакуумный паромасляный диффузионный насос с улучшенным фракционированием и обезгаживанием масла.

Насос с улучшенным фракционированием и обезгаживанием способен на обычном минеральном масле без применения азотной ловушки создавать предельное остаточное давление $1 \cdot 10^{-6}$ Па.

Ухудшение условий охлаждения насоса при повышении температуры воды ведет к заметному повышению предельного остаточного давления и уменьшению скорости действия. Однако в ряде случаев, особенно в передвижных вакуумных установках, например в масс-спек-

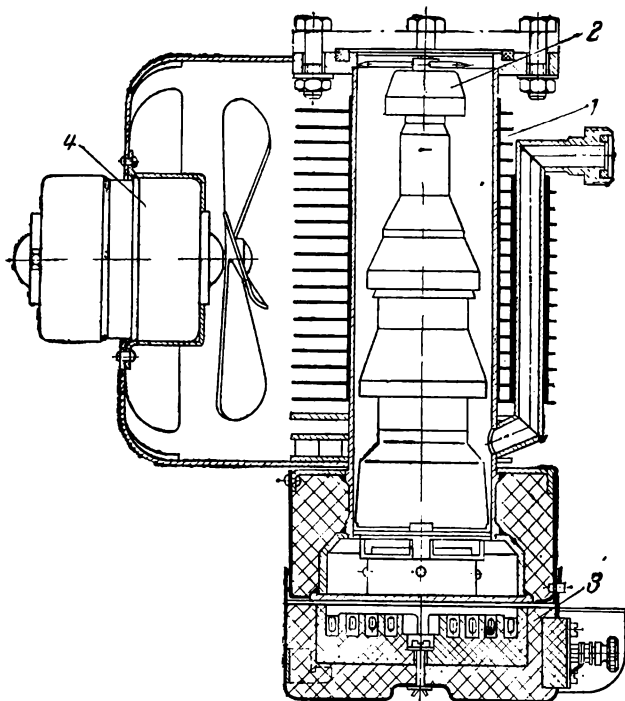


Рис. 7.25. Паромасляный диффузионный насос с воздушным охлаждением.

1 — корпус насоса с радиатором; 2 — паропровод; 3 — нагреватель; 4 — вентилятор.

тронетрическом течеискателе, эксплуатация насосов с водяным охлаждением неудобна, и здесь используются небольшие диффузионные насосы с принудительным воздушным охлаждением. Устройство такого насоса показано на рис. 7.25.

Проведенное рассмотрение показывает, что основные характеристики паромасляных насосов (диффузионных и бустерных) определяются как конструкцией насоса, так и родом рабочей жидкости.

На рис. 7.26 показано влияние мощности подогрева на характеристики насосов. У всех насосов существует порог мощности подогрева 1 , ниже которого насос не работает совсем. Кривая 2 показывает, что наибольшее выпускное давление $p_{\text{наиб}}$ возрастает по мере увеличения мощности подогрева; это объясняется увеличением плотности струи. Предельное остаточное давление $p_{\text{ост}}$

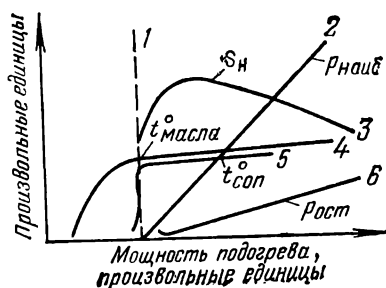


Рис. 7.26. Изменение характеристик паромасляных диффузионных насосов в зависимости от мощности подогрева.

1 — порог; 2 — наибольшее выпускное давление; 3 — быстрота действия; 4 — температура масла в кипятильнике; 5 — температура сопла; 6 — предельное остаточное давление.

(кривая 6) вначале уменьшается, что связано с уменьшением противодиффузии газов через струю по мере увеличения плотности струи, и у паромасляных диффузионных насосов проходит через минимум, лежащий вблизи пороговой мощности подогрева; дальнейшее увеличение предельного остаточного давления объясняется разложением масла в кипятильнике и заносом образующихся легких фракций в сопло первой ступени. Заметим, что в паротурбинных насосах этого не происходит. Быстро-

дества S_n (кривая 3) проходит через максимум, что связано с изменением плотности струи.

Основные характеристики пароструйных диффузионных насосов существенно зависят от молекулярной массы откачиваемого газа, что связано с большим коэффициентом диффузии у легких газов (водород, гелий) через паровую струю, чем у тяжелых газов (аргон, азот) [см. § 1.12]. На рис. 7.27 показано влияние выпускного давления азота и водорода на предельное остаточ-

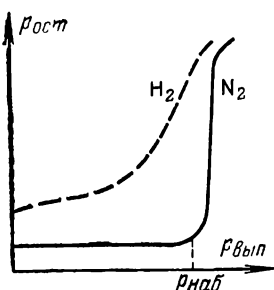


Рис. 7.27. Изменение предельного остаточного давления в паромасляном диффузионном насосе в зависимости от выпускного давления для азота N_2 и водорода H_2 .

ное давление. Увеличение выпускного давления азота в довольно широких пределах не влияет на предельное остаточное давление; только при превышении наибольшего для данного насоса выпускного давления $p_{\text{наиб}}$ происходит резкое повышение давления на впуске, и насос прекращает работу. Увеличение выпускного давления водорода сразу же сказывается на предельном

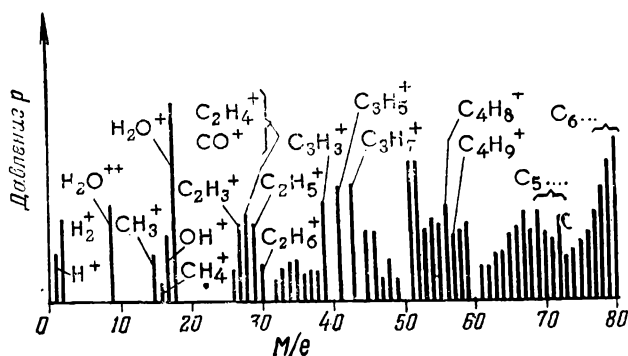


Рис. 7.28. Участок спектра масс остаточных газов паромасляного диффузионного насоса с водоохлаждаемой ловушкой; рабочая жидкость — полифенилметилсилоксан.

остаточном давлении насоса. *Теоретическая быстрота действия* S_T паровой струи при молекулярном режиме течения газа определяется проводимостью входного сечения насоса.

Истинная быстрота действия насоса S_n за счет отражения части молекул от струи и противодиффузии газа меньше теоретической S_T ; отношение $S_n/S_T = \alpha$ зависит от рода газа и составляет обычно для воздуха 0,3—0,5.

Быстрота действия диффузионных насосов уменьшается как в области высоких давлений, так и в области предельного остаточного давления (рис. 7.23).

Уменьшение быстроты действия диффузионного насоса в области высоких давлений объясняется возрастанием выпускного давления (из-за органиченности быстроты действия форвакуумного насоса) и нарушением работы паровой струи. Уменьшение быстроты действия в области предельного остаточного давления связано с возрастающим влиянием заноса газа в верхнее сопло и противодиффузии газа через струю.

Состав остаточных газов паромасляного диффузионного насоса представляет собой широкий набор углеводородных соединений с массовыми числами до 250. На рис. 7.28 показан участок спектра масс остаточных газов такого насоса до массового числа 80. С помощью эффективных ловушек (см. гл. 9) из состава остаточных газов могут быть исключены практически все углеводородные соединения.

Обратный поток паров масла (см. § 9.1), поступающий в единицу времени с единицы площади сечения впускного патрубка диффузионного насоса, работающего без ловушки, составляет обычно $1\text{--}5 \text{ мг}/(\text{ч}\cdot\text{см}^2)$. С помощью эффективных ловушек эта величина может быть уменьшена до $1\cdot 10^{-5}\text{--}1\cdot 10^{-6} \text{ мг}/(\text{ч}\cdot\text{см}^2)$. Резкие непродолжительные увеличения обратного потока паров масла имеют место в периоды запуска и остановки насоса, когда паровая струя еще не сформировалась или уже потеряла форму.

Часто диффузионный насос с затвором, маслоотражателем и ловушкой выполняется как единая вакуумная установка, которая называется *вакуумным агрегатом*.

Практические указания по эксплуатации

Струйные насосы должны эксплуатироваться только с рекомендованной рабочей жидкостью, для которой заводом-изготовителем (разработчиком) выбраны критические проходные сечения сопл и режим эксплуатации. Эксплуатационные мероприятия сводятся в основном к сохранению количества и качества рабочей жидкости в насосе и к мерам защиты откачиваемого сосуда от чрезмерного проникновения в него паров масла. Для этого следует придерживаться обычной последовательности операций при запуске насоса: откачать пароструйный насос форвакуумным насосом, включить подачу охлаждающей воды, включить нагреватель (при этом возможно небольшое увеличение давления за счет газовой выделения из разогреваемого масла); после запуска насоса (через 30—60 мин в зависимости от его размеров) охладить азотную ловушку и медленно открыть затвор или кран на входе насоса (при этом давление в откачиваемом сосуде должно быть не выше рекомендованного начального давления). Остановка насоса всегда начинается с закрытия затвора, затем размора-

живается азотная ловушка и после этого выключается нагреватель. Форвакуумная откачка и водяное охлаждение прекращаются после охлаждения кипятильника, которое можно ускорить, сняв нагреватель и обдувая кипятильник воздухом. В некоторых насосах в днище кипятильника имеются каналы водяного охлаждения, что значительно сокращает время охлаждения насоса.

Рассмотрим аварийные ситуации. При разгерметизации откачиваемого сосуда или прекращении подачи охлаждающей воды должен быть перекрыт затвор на впуске насоса и отключен нагреватель; форвакуумная откачка при этом продолжается.

При аварийной остановке форвакуумного насоса должны быть перекрыты форвакуумный кран и затвор на впуске, а также отключен нагреватель.

При выходе из строя нагревателя должен быть перекрыт затвор на впуске.

Работа нагревателя при повышенном давлении в насосе (например, если забыли включить форвакуумную откачку или при аварии в форвакуумной системе некоторое время не был отключен нагреватель) ведет к перегреву рабочей жидкости. В таких случаях следует до начала форвакуумной откачки дать рабочей жидкости несколько остыть, отключив нагреватель, в противном случае бурное вскипание перегретой рабочей жидкости приводит к сильным выбросам ее из насоса. Некоторый унос рабочей жидкости в форвакуумную коммуникацию происходит при прохождении через разогретый насос больших потоков газа.

7.7. ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия

Принцип действия турбомолекулярного насоса основан на сообщении молекулам разреженного газа направленной дополнительной скорости быстро движущейся твердой поверхностью.

Схема турбомолекулярного насоса показана на рис. 7.29. Рабочий механизм насоса образован роторными 3 и статорными 2 дисками, имеющими радиальные косые пазы — каналы, боковые стенки которых наклонены относительно плоскости диска под углом 40—15°; причем пазы статорных дисков расположены зеркально относительно пазов роторных дисков (рис. 7.30). Между

статорными дисками и валом ротора и между роторными дисками и корпусом насоса имеются зазоры.

При молекулярном режиме течения газа в насосе, т. е. при давлениях ниже $1-10^{-1}$ Па, такая система подвижных и неподвижных пазов обеспечивает преимущественное прохождение молекул газа в направлении

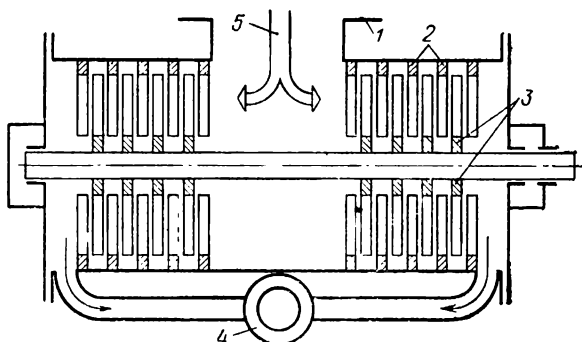


Рис. 7.29. Принципиальная схема турбомолекулярного насоса.

1 — корпус; 2 — статорные диски; 3 — роторные диски; 4 — выпускной патрубок; 5 — всасывающий патрубок.

откачки (слева направо на рис. 7.30). Действительно, молекула газа, прошедшая через статорный паз (или отразившаяся от статорного диска и движущаяся к роторному диску слева), попав в паз роторного диска, имеет большую вероятность пройти через него, так как боковая стенка 1 роторного паза уходит с пути молекулы, а стенка 2 не может ее нагнать, в то время как такая же молекула, подходящая к роторному диску справа, т. е. против направления откачки, вошедшая в паз, будет с большой вероятностью задержана стенкой 2 роторного паза и отражена обратно в направлении откачки. Молекулы, отраженные роторным диском, кроме *тепловой скорости*, приобретают *дополнительную скорость*. Эта скорость равна окружной скорости роторного диска и направлена параллельно оси насоса (на рис. 7.30 вправо). Благодаря соответствующему углу наклона боковых стенок статорного паза здесь также обеспечивается преимущественное прохождение молекул в направлении откачки.

Таким образом, каждая ступень, состоящая из роторного и статорного дисков, создает перепад давлений, причем наибольшее отношение давлений по обе стороны

ступени (степень сжатия) $(p_2/p_1)_{\text{макс}}$ равно приблизительно отношению $\Sigma_{1-2}/\Sigma_{2-1}$ вероятностей перехода молекул через паз в направлении откачки Σ_{1-2} и в обратном направлении Σ_{2-1} , а наибольшая возможная быстрота ступени (при $p_1=p_2$) пропорциональна разности $\Sigma_{1-2}-\Sigma_{2-1}$. В области достигнутых окружных скоростей в современных промышленных турбомолекулярных насосах разность $\Sigma_{1-2}-\Sigma_{2-1}$ почти линейно зависит от $v_{\text{окр}}/u_v$, т. е. эффективность насоса возрастает с ростом окружной скорости $v_{\text{окр}}$ ротора и с уменьшением наиболее вероятной скорости молекул u_v .

Расчеты показывают, что максимальная быстрота действия достигается при угле наклона пазов около 30° . С другой стороны для получения достаточно высокой степени сжатия в одной ступени (от 3 до 5) угол наклона паза должен быть не более 20° . Поэтому в современных насосах высоковакуумные ступени выполняются с углом наклона 35° , а все остальные — 20° .

Для «быстрых» молекул (легких газов) окружная скорость ротора является относительно меньшей, чем для «медленных» молекул (тяжелых газов), поэтому коэффициент сжатия ступени заметно меньше для легких газов. Каждый роторный и статорный диск создает небольшой перепад давлений, однако благодаря большому количеству последовательных ступеней (30—40) обеспечивается высокий коэффициент сжатия насоса в целом (10^2-10^3 по водороду, 10^7-10^9 по азоту).

Так как турбомолекулярные насосы имеют очень высокий коэффициент сжатия для тяжелых газов, то во время работы эти насосы являются надежным барьером против проникновения тяжелых молекул масла из форвакуумной полости насоса.

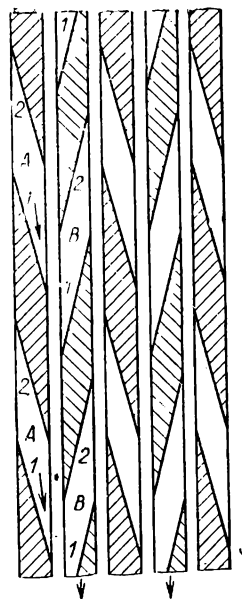


Рис. 7.30. Роторные и статорные диски с пазами (вид по радиусу).

Конструкции и характеристики

Внешние виды отечественных турбомолекулярных насосов (с горизонтальным ротором и вертикальным ротором) показаны на рис. 7.31. Высокая надежность насосов достигается тем, что они приводятся во вращение от высокочастотного электродвигателя, ротор которого расположен в форвакуумной полости на общем

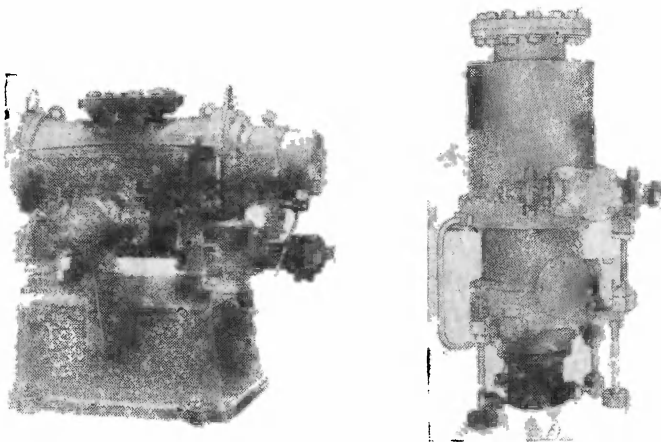


Рис. 7.31. Турбомолекулярные насосы.

а — с горизонтальным ротором; *б* — с вертикальным ротором.

валу с ротором насоса. Таким образом, исключается вакуумный ввод вращения, манжеты которого подвержены износу. Ротор вращается с частотой около 18 000 об/мин и перед сборкой насоса подвергается тщательной динамической балансировке, что обеспечивает работу насоса без шума и вибраций, а также долговечность подшипников. Смазка подшипников осуществляется маслonaсосом, имеющим небольшой собственный электродвигатель. В случае аварийного отключения электроэнергии подача смазки прекращается, а ротор турбомолекулярного насоса способен по инерции вращаться еще 40—60 мин. Однако это не ведет к повреждению подшипников, имеющих текстолитовые сепараторы.

Небольшой поток воды используется для охлаждения статорной обмотки электродвигателя и торцевых крышек, отделяющих подшипники от полости на выходе из последнего форвакуумного диска насоса, с тем чтобы уменьшить в этой области давление паров масла.

На рис. 7.32 показан состав остаточных газов в турбомолекулярном насосе. Из рисунка видно, что основным остаточным газом является водород (массовое

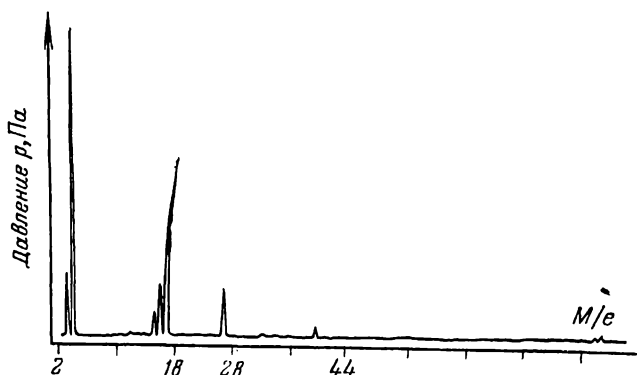


Рис. 7.32. Спектр остаточных газов в турбомолекулярном насосе.

число 2). Кроме того, содержится небольшое количество паров воды (массовое число 18), смесь окиси углерода и азота (массовое число 28) и двуокиси углерода (массовое число 44). Таким образом, в остаточных газах тяжелые углеводородные соединения не обнаруживаются и турбомолекулярные насосы с достаточным основанием считаются *безмасляными средствами откачки*, хотя в их форвакуумных полостях присутствуют пары масла, используемого для смазки подшипников насоса, и пары масла, попадающие туда из механического вакуумного насоса.

На рис. 7.33 показана зависимость быстроты действия турбомолекулярного насоса ($S_H=200$ л/с) от впускного давления. Как видно, быстрота действия остается постоянной в широком диапазоне давлений — от 10^{-1} Па, когда начинает сказываться изменение режима течения газа через диски насоса, до 10^{-6} Па, когда на быстроту действия оказывает влияние водород, выделяющийся из стенок насоса и перетекающий со стороны форвакуумной полости насоса.

Предельное остаточное давление турбомолекулярных насосов составляет 10^{-7} — 10^{-8} Па.

Достоинства турбомолекулярных насосов — быстрый запуск, малая селективность при откачке различных газов, отсутствие паров масла и продуктов его разложения в остаточной атмосфере, возможность получения сверхвысокого вакуума без использования ловушек на входе. Механизм насоса не повреждается при прорывах

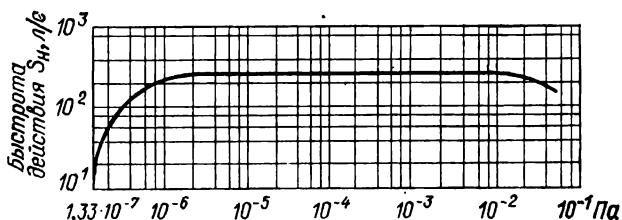


Рис. 7.33. Зависимость скорости действия турбомолекулярного насоса с скоростью действия 200 л/с от входного давления.

атмосферного воздуха. Все это обусловило их широкое применение во многих отраслях науки и промышленности.

Практические указания по эксплуатации

При эксплуатации турбомолекулярных насосов необходимо контролировать поступление масла к подшипникам (для чего в насосе предусмотрены смотровые окна) и отсутствие шумов, появление которых свидетельствует об износе подшипников. Недопустима длительная выдержка остановленного турбомолекулярного насоса под форвакуумным давлением (ниже 10 Па), так как при этом пары масла могут проникнуть со стороны форвакуума через роторный механизм на сторону высокого вакуума. Остановленный турбомолекулярный насос должен быть заполнен осушенным воздухом или азотом до атмосферного давления через кран, имеющийся в форвакуумной патрубке насоса.

Небольшое количество паров масла, попавшее на вход турбомолекулярного насоса, обычно легко удаляется прогревом корпуса в области входного патрубка до 100 — 120°C при работающем турбомолекулярном насосе.

Большую опасность для работы насоса представляет попадание в него твердых частиц. При наличии такой опасности во входном патрубке насоса должна быть установлена металлическая сетка с размерами ячейки 1×1 мм.

7.8. АДСОРБЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия адсорбционных насосов основан на способности предварительно обезгаженных твердых пористых тел поглощать газы и пары в основном за счет физической адсорбции.

Адсорбционные насосы нашли применение в системах безмасляной откачки как для создания предварительного разрежения, так и для получения и поддержания весьма низких давлений в высоковакуумных сосудах. В качестве поглощающих материалов (адсорбентов) могут применяться силикагели, алюмогели, цеолиты и активированные угли.

Однако наибольшее распространение в качестве адсорбента получили *цеолиты*, представляющие собой алюмосиликаты щелочного или щелочноземельного металла, природного или искусственного происхождения. Характеристики структуры цеолитов приведены в табл. 7.1. Пористую структуру и очень хорошие адсорбирующие свойства они приобретают после прокаливания; при этом кристаллическая решетка не разрушается, и после удаления кристаллизационной воды в цеолитах получаются очень равномерные по размерам тон-

Таблица 7.1

Характеристики некоторых цеолитов

Марка цеолита	Средний диаметр пор, нм	Объем пор, $\times 10^{-4}$ м ³ /кг	Адсорбционный объем гранулированного цеолита, $\times 10^{-4}$ м ³ /кг	Максимальная адсорбция азота, $\times 10^4$ м ³ . Па/кг
KA	0,3	2,8	1,9	1,57
NaA	0,4			
CaA	0,5	3,0	2,0	1,60
CaX	0,7			
NaX	0,8—0,9	3,2	2,3	1,86

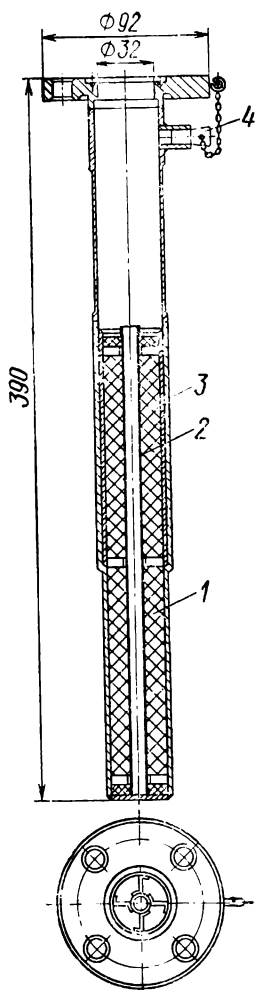


Рис. 7.34. Адсорбционный насос.

кие поры. В поры могут проникать только те газы, диаметр молекул которых меньше размера пор, т. е. цеолиты обладают избирательным поглощением газов, и это дало повод называть их «молекулярными ситами». Например, цеолит марки СаА обладает порами с диаметром 0,5 нм, цеолит марки NaX — 0,9 нм. Напомним, что диаметры молекул основных атмосферных газов O_2 , N_2 , CO_2 близки к 0,3 нм. Многочисленные поры образуют большую удельную поверхность. Так, у цеолита СаА поры имеют удельную поверхность, достигающую $600 \text{ м}^2/\text{г}$.

Недостатками цеолитов, как, впрочем, и других адсорбентов, являются то, что они плохо поглощают инертные газы, в частности аргон, содержание которого в воздухе достигает 1%, а также практически полная их неэффективность по отношению к газам с очень низкой точкой кипения (H_2 , He, Ne).

С увеличением количества поглощенного газа при неизменной температуре адсорбента возрастает равновесное давление откачиваемого газа. Вместе с тем при одном и том же количестве поглощенного газа равновесное давление над поверхностью адсорбента тем меньше, чем ниже его температура. Поэтому в вакуумных адсорбционных насосах адсорбент обычно охлаждается жидким азотом и, реже, жидким водородом или гелием.

Устройство адсорбционного насоса показано на рис. 7.34. В цилиндрический корпус 3, изготовленный из нержавеющей стали, вставлена перфорированная

трубка 2. Кольцевое пространство между трубкой и корпусом заполнено адсорбентом 1. Для охлаждения адсорбента на насос снизу одевается сосуд Дьюара, в который заливают жидкий азот. После окончания откачки кран на входе насоса закрывается, сосуд Дьюара снимают, и насос отогревается до комнатной температуры. При этом вследствие обратного выделения газа из адсорбента давление в объеме насоса может превысить атмосферное. В связи с этим в верхней части насоса предусмотрен клапан (пробка) 4, предохраняющий насос от разрушения при выделении газа из адсорбента. Такого отогрева с выпуском выделяющихся газов в атмосферу достаточно, чтобы насос был готов к следующему циклу откачки.

Предельное остаточное давление адсорбционного насоса определяется адсорбционной емкостью адсорбента и зависит от количества поглощенного насосом газа.

С целью получения низких предельных остаточных давлений рекомендуется осуществлять предварительную откачку сосуда до давления 10^4 Па водоструйным или механическим вакуумным насосом. Иногда в качестве насоса для форвакуумной откачки используют другой также адсорбционный насос.

Основным достоинством адсорбционных насосов является полное отсутствие органических загрязнений откачиваемого сосуда. Недостатки насосов — необходимость использования жидкого азота, периодическая регенерация и довольно значительное время охлаждения насоса.

7.9. ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия

Испарительные геттерные насосы относятся к сорбционным насосам, в которых поглощение газов осуществляется за счет физической адсорбции, хемосорбции, химических реакций и растворения газов в пленке металлического геттера, создаваемой методом термического испарения. В качестве геттера в таких насосах может быть, вообще говоря, использован любой активный металл, применяемый для распыляемых геттеров в электровакуумных приборах; однако из условий эксплуатационного удобства в промышленных насосах применяется пока только титан. Титан образует прочные

Нелетучие соединения или твердые растворы почти со всеми газами, имеющимися в вакуумных системах, за исключением инертных газов и углеводов. Отличие в механизме поглощения различных газов приводит к тому, что быстрота действия испарительных геттерных насосов по разным газам неодинакова [см. (6.2)].

Равновесное давление газа над пленкой геттера зависит от ее температуры, свойств образующихся соединений, от степени насыщения пленки газом и т. п. В насосах постоянно обновляемая пленка геттера непрерывно поддерживается в активном состоянии, поэтому предельное остаточное давление насоса определяется газовыделением из распыленного геттера и элементов конструкции насоса.

Отметим, что на поверхности титановой пленки при комнатной температуре происходит реакция синтеза метана, образующегося из всегда присутствующих в системе углерода и водорода.

При охлаждении титановой пленки до температуры кипения жидкого азота скорость реакции синтеза метана резко уменьшается, а быстрота действия насоса по активным газам (N_2 , O_2 , CO и H_2) возрастает из-за увеличения их коэффициента прилипания.

Коэффициент прилипания для чистых пленок титана, не сорбировавших газы, при комнатной температуре составляют 0,4—0,5 для N_2 ; 0,6—0,7 для O_2 и CO и примерно 0,05 для H_2 ; при охлаждении пленки жидким азотом коэффициент прилипания увеличивается до 0,9—1 для N_2 , O_2 , CO и до 0,4—0,5 для H_2 .

Конструкции и характеристики

На рис. 7.35 показана схема сверхвысоковакуумного агрегата, состоящего из испарительного геттерного насоса 1, азотной ловушки 4 и паромасляного диффузионного насоса 5.

В испарительном геттерном насосе титан конденсируется на внутренней стенке цилиндрического экрана 6, охлаждаемой жидким азотом, подаваемым из сосуда Дьюара 2. Испаритель титана 3 содержит запас титановой проволоки и механизм для ее периодической подачи в водоохлаждаемый медный тигель — анод. Испарение титана происходит путем разогрева титановой проволоки электронной бомбардировкой с помощью имеющейся в испарителе электронной пушки. Такой спо-

соб нагрева обеспечивает значительную скорость испарения титана при минимальном тепловом излучении, что определяет сравнительно небольшой расход азота (приблизительно 5 л/ч). Небольшой экран, установленный вблизи испарителя, практически исключает попадание титана в откачиваемый сосуд.

Предельное остаточное давление агрегата составляет 10^{-10} Па, быстрота действия по водороду в диапазоне давлений 10^{-4} — 10^{-8} Па в 2,8 раза больше, чем по азоту. Такая разница в быстроте действия по этим газам объясняется главным образом более высокой проводимостью входного патрубка насоса по водороду.

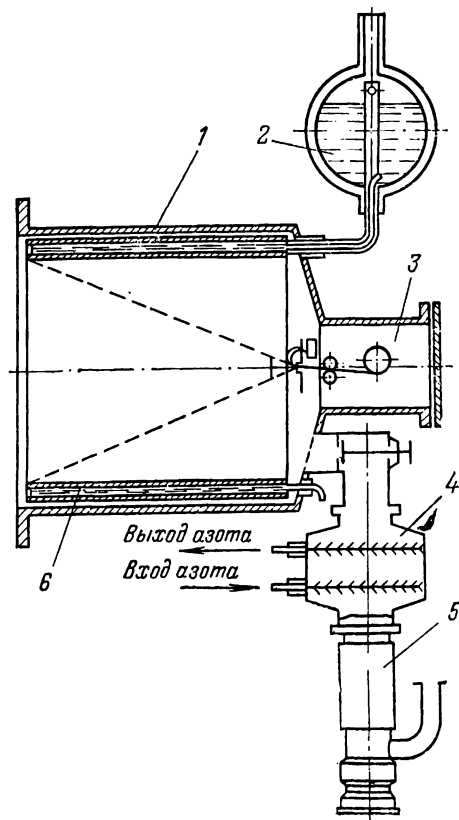


Рис. 7.35. Сверхвысоковакуумный агрегат.

1 — испарительный геттерный насос; 2 — сосуд Дьюара; 3 — испаритель титана; 4 — азотная ловушка; 5 — паромасляный диффузионный насос; 6 — экран.

В некоторых вакуумных установках (для исследования термоядерных реакций, имитации космических условий и т. п.) титан конденсируется на охлаждаемые жидким азотом экраны, установленные непосредственно внутри сосуда, причем рабочая зона сосуда экранирована от попадания паров титана. Такое устройство получило название *азотит*. При этом достигаются высокая быстрота действия (до сотен тысяч л/с) и предельное остаточное давление до 10^{-10} — 10^{-11} Па.

7.10. ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия

Испарение геттера в электродуговых геттерных насосах происходит с поверхности титанового катода за счет высокой концентрации энергии в катодном пятне электрической дуги постоянного тока. Плотность тока в катодном пятне достигает 10^{10} — 10^{11} А/м².

Катодное пятно хаотически перемещается по поверхности титана, благодаря чему обеспечивается равномерное испарение материала катода.

Благодаря тому, что дуга горит в парах испаряющегося металла, создаются условия для ее стабильного горения при сколь угодно низком давлении остаточных газов.

Конструкции и характеристики

На рис. 7.36 приведена одна из конструкций электродугового геттерного насоса.

В корпусе 1, являющемся анодом системы, размещен катод 2 с поджигающим устройством 3, собранные на общем фланце 4. Катод 2 представляет собой титановый диск, который крепится титановыми шпильками к медному основанию 5, охлаждаемому водой. Боковые поверхности основания 5, титанового диска и электрического ввода 6 закрыты металлическим экраном 7, предотвращающим возникновение дуги между поверхностями этих деталей и корпусом насоса — анода. В экране 7 предусмотрен вырез для подвода поджигающего электрода 8. Поджигающий электрод через балластное сопротивление, ограничивающее ток короткого замыкания, соединен с корпусом насоса. Питание дуги осуществляется от источника постоянного тока.

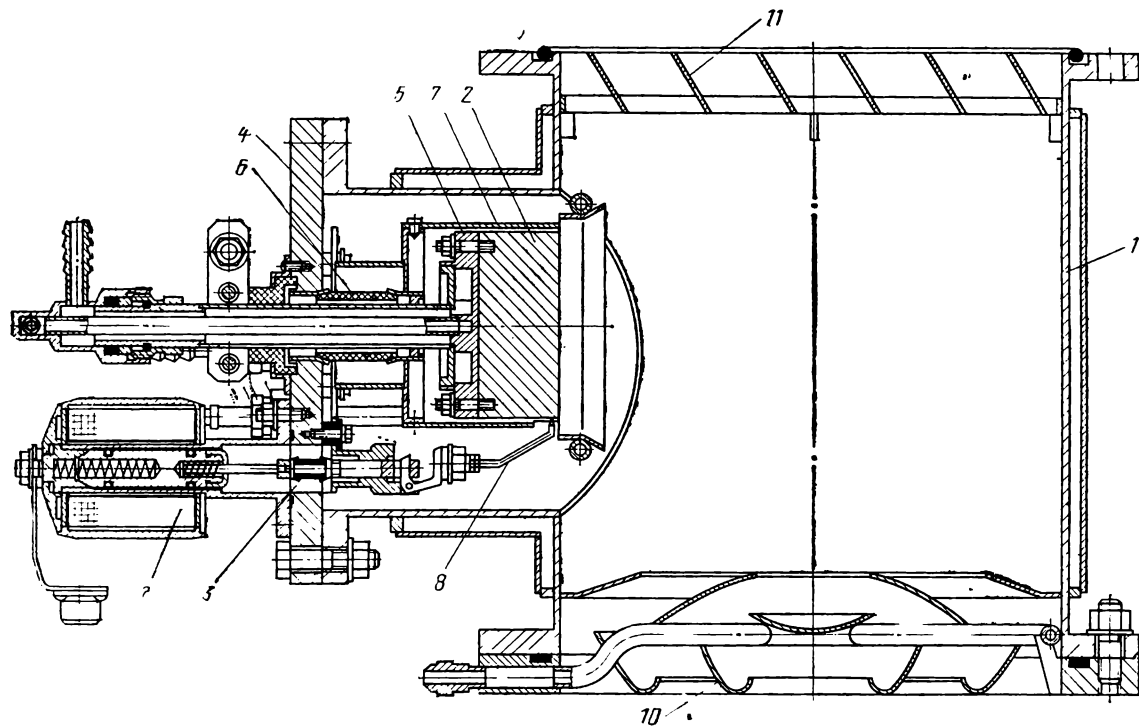


Рис. 7.36. Электродуговой геттерный насос.

Возбуждение дуги производится кратковременным закорачиванием катода с поджигающим электродом. Для этого подают напряжение на электромагнит 9, который подводит электрод 8 к катоду 2. В момент отвода электрода 8 возвратной пружиной между катодом 2 и анодом — корпусом насоса возникает устойчивая электрическая дуга. Напряжение поджига дуги лежит в пределах 25—35 В, а ток стабильного горения дуги составляет примерно 140 А при напряжении 20—21 В. Скорость испарения титана при этом достигает 15—17 г/ч. Для уменьшения скорости испарения титана с целью более рационального его расходования применяют периодический режим работы насоса. Причем чем ниже давление в откачиваемом сосуде, тем больше делают паузу между моментами включения насоса.

При испарении титана на стенках насоса непрерывно образуется свежая активная пленка, на поверхности которой и происходит поглощение активных газов.

Для откачки инертных газов к нижнему фланцу насоса через водоохлаждаемую ловушку 10 присоединяется дополнительный паромасляный диффузионный насос, быстрота действия которого должна составлять 2—5% быстроты действия электродугового геттерного насоса.

Верхним фланцем, в сечении которого установлен отражательный экран 11, насос подсоединяется к откачиваемому сосуду. Экран 11 предусмотрен для предотвращения попадания испаряющегося титана во внутреннюю полость откачиваемого сосуда.

Быстрота действия геттерных электродуговых насосов может достигать 10^4 — 10^5 л/с. Предельное остаточное давление насоса составляет 10^{-5} Па при откачке инертных газов дополнительным насосом и $(5-2) \times 10^{-4}$ Па без такой откачки дополнительным насосом.

Электродуговые геттерные насосы используют простые источники питания, снабжены большим количеством геттерного материала и просты по устройству.

7.11. ИОННО-ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия

Геттерные насосы малоэффективны при откачке инертных газов и для получения низких предельных остаточных давлений (менее 10^{-4} Па) требуют приме-

нения дополнительных насосов. В то же время при возбуждении и ионизации откачиваемых газов электронным потоком или в электрическом разряде поглощение газов титановой пленкой идет более интенсивно, причем благодаря ионизации откачиваются и инертные газы.

В современных ионно-геттерных насосах обычно *совмещены геттерные и ионные методы откачки*. Принцип действия ионно-геттерных насосов основан на поглощении газов периодически или непрерывно наносимой пленкой титана и улучшении откачки инертных газов и углеводородов путем ионизации и улавливания положительных ионов. Испарение титана в ионно-геттерных насосах происходит, как правило, из *твердой фазы*.

Конструкции и характеристики

Принципиальная схема ионно-геттерного насоса представлена на рис. 7.37. Испарение титана на стенки водоохлаждаемого корпуса 4 насоса производится из твердой фазы с прямонакальных испарителей 2, пред-

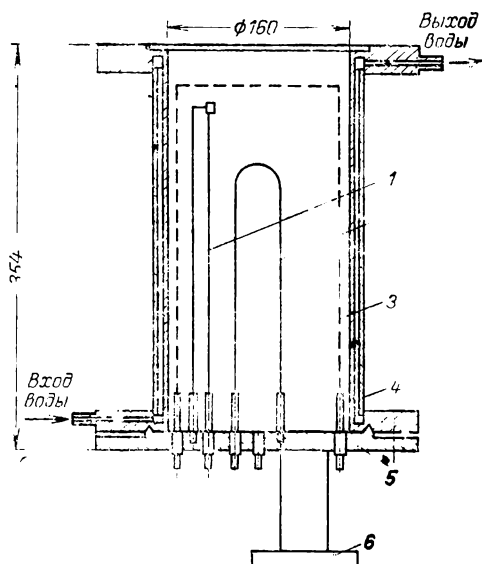


Рис. 7.37. Схема ионно-геттерного насоса.

1 — вольфрамовый катод; 2 — испаритель титана; 3 — анод; 4 — корпус; 5 — фланец; 6 — патрубок для присоединения насоса предварительной откачки.

ставляющих собой молибденовый U-образный стержень (кери), на который нанесен слой титана.

Ионизация, необходимая для откачки инертных газов и углеводородов, осуществляется электронами, эмиттируемыми термокатодом 1.

Эффективность ионизации повышена за счет увеличения длины пробега электронов. Это достигается применением «прозрачного» для электронов анода 3, на ко-

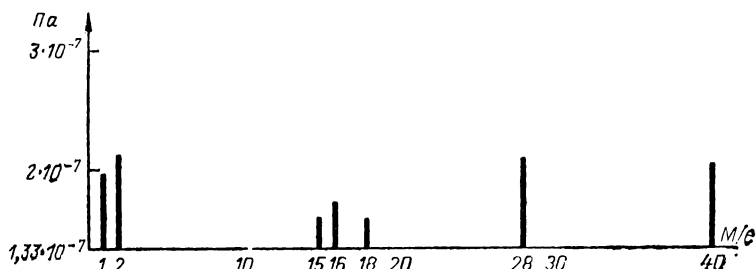


Рис. 7.38. Состав остаточных газов в ионно-геттерном насосе.

горый подается положительное относительно катода напряжение 1000—1200 В. Анод 3, выполненный из молибденовой проволоки, используется также и в качестве внутреннего нагревателя для обезгаживания насоса при подготовке его к работе.

Коллектором ионов является корпус насоса с напыленной титановой пленкой, в которую и внедряются образовавшиеся ионы.

Таким образом, так же как и в геттерных насосах, химически активные газы поглощаются пленкой титана, непрерывно наносимой на внутреннюю поверхность корпуса насоса, а откачка инертных газов осуществляется путем ионизации и последующего внедрения ионов в пленку геттера.

В составе остаточных газов ионно-геттерных насосов (рис. 7.38), помимо обычно присутствующих в вакуумных системах водорода (массовые числа 2 и 1), паров воды (массовые числа 18 и 17), а также азота и окиси углерода (массовое число 28), наблюдаются аргон (массовое число 40) и метан (массовые числа 16 и 15).

Быстрота действия насоса в зависимости от впускного давления для воздуха представлена на рис. 7.39; увеличение быстроты действия при откачке ионно-геттерного насоса дополнительным диффузионным насосом

объясняется улучшением откачки инертных газов и в первую очередь аргона.

Уменьшение быстроты действия при давлениях выше 10^{-4} Па объясняется большей степенью насыщения пленки титана при высоких давлениях (при постоянной скорости его испарения), вследствие чего уменьшается коэффициент прилипания газа.

Предельное остаточное давление геттерно-ионных насосов составляет около 10^{-7} Па, а давление запуска около 10^{-1} Па, так как при

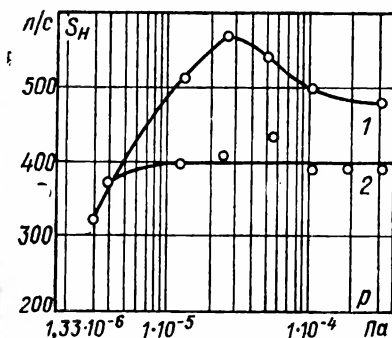


Рис. 7.39.

Рис. 7.39. Зависимости быстроты действия ионно-геттерного насоса от впускного давления для воздуха.

1 — с откачкой дополнительным пароструйным диффузионным насосом; 2 — без откачки дополнительным насосом.

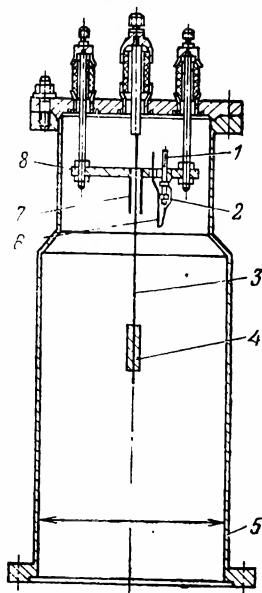


Рис. 7.40.

Рис. 7.40. Орбитронный ионно-геттерный насос.

1 — изолятор; 2 — катод; 3 — анод; 4 — титановый цилиндр; 5 — корпус; 6 — экран — токоввод катода; 7 — экран анода; 8 — пластина.

более высоких давлениях возникает опасность перегорания вольфрамового катода.

Дальнейшим развитием ионно-геттерных насосов с испарением титана явились орбитронные ионно-геттерные насосы, в которых удачно сочетаются простота конструкций с высокой стабильностью работы. Схема орбитронного ионно-геттерного насоса показана на рис. 7.40.

В корпусе 5 размещен центральный электрод (анод) 3 с титановым цилиндром 4. Верхняя часть электрода 3 защищена трубкой 7. На пластине 8 укреплен керамический стержень 1, на котором крепится катод 2, изготовленный из вольфрамовой проволоки. Токовводом и экраном катода служит проволочка 6 из тантала. Корпус насоса заземлен, а на центральный электрод 3 подается положительное напряжение 4—5 кВ. Пластины и трубка 7 имеют одинаковый с катодом потенциал. Расположение и конфигурация катода и танталового токоввода выбраны так, что осевая и радиальная симметрия электрического поля нарушена. Кроме того, к катоду приложено положительное напряжение смещения (от 50 до 250 В) относительно корпуса насоса. В результате электроны, эмиттируемые катодом, движутся со скоростью, имеющей *осевую, радиальную и тангенциальную составляющие*.

Ввиду того, что электрическое поле несимметрично и векторы скоростей электронов направлены под углом к силовым линиям электрического поля, направление движения электронов будет непрерывно меняться и их попадание на центральный электрод, имеющий малое поперечное сечение, затруднено. Попадание электронов на корпус также исключено благодаря положительному смещению на катоде.

В результате электроны движутся по орбитам достаточно долго, проходят большие расстояния, и интенсивность ионизации газа резко увеличивается. Часть электронов, траектории которых проходят вблизи центрального электрода 3, попадает на титановый цилиндр 4 и разогревает его до температуры 1430 К. При этом происходят испарение титана из твердой фазы и его конденсация на внутренней поверхности корпуса насоса.

Так же, как и в предыдущей конструкции ионно-геттерного насоса, откачка активных газов орбитронным ионно-геттерным насосом идет путем поглощения их пленкой титана, непрерывно наносимой на внутреннюю поверхность корпуса насоса.

В отличие от описанного выше ионно-геттерного насоса в орбитронном ионно-геттерном насосе благодаря увеличению длины свободного пути электронов (до нескольких метров) быстрота откачки инертных газов значительно увеличена.

Следует отметить, что примененный в этом насосе испаритель при достаточно большом запасе испаряемого вещества имеет небольшую тепловыделяющую поверхность, что позволяет размещать внутри насоса дополнительный охлаждаемый жидким азотом экран, на который наносится пленка титана, при этом резко уменьшается предельное остаточное давление насоса (менее 10^{-11} Па).

Большим достоинством геттерно-ионных насосов, как и других сорбционных насосов, является отсутствие рабочей жидкости, что позволяет получать с их помощью вакуум, практически свободный от углеводородных загрязнений (безмасляный вакуум). Эти насосы не требуют охлаждаемых ловушек на входе и часто присоединяются к откачиваемому сосуду без промежуточного крана, благодаря чему эффективно используется быстрота действия насоса. Как все сорбционные насосы, геттерно-ионные насосы не боятся аварийных отключений энергии, так как при этом наблюдается довольно медленный рост давления в откачиваемом сосуде, бесшумны в работе, не создают вибраций, не требуют непрерывной работы насосов предварительного разрежения. Насосы с термическим испарением титана очень быстро запускаются в работу.

Основные недостатки ионно-геттерных насосов с термическим испарением титана состоят в отсутствии саморегулирования скорости испарения активного вещества, наличии накаливаемых элементов в электродной системе и в некоторой сложности источников электропитания.

Практические указания по эксплуатации

При использовании геттерных насосов желательно обеспечивать безмасляную предварительную откачку сосуда до давления менее 10^{-1} Па с помощью адсорбционных насосов или паромасляных диффузионных насосов с эффективными ловушками. Не следует допускать чрезмерно длительной откачки сосуда механическим насосом с масляным уплотнением из-за возможного загрязнения сосуда углеводородами.

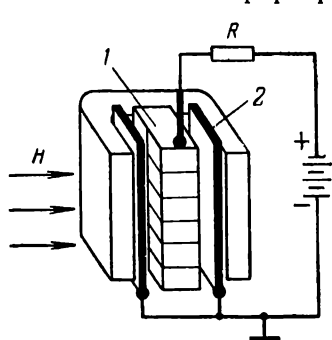
Эксплуатация насосов связана с необходимостью периодической чистки внутренних поверхностей насоса от нанесенной пленки титана.

При механической чистке насосов от слоев нанесенного титана следует использовать респиратор или плотную марлевую повязку для защиты от вдыхания титановой пыли и рукавицы для защиты рук от небольших вспышек на титановой пленке, которые могут возникнуть при использовании металлической щетки.

7.12. МАГНИТНЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия

В отличие от ионно-геттерных насосов с термическим испарением титана в магнитных электроразрядных насосах для получения активных пленок и для ионизации газов используются *разряд в магнитном поле* и вызванное им катодное распыление титана. Вследствие этого в магнитных электроразрядных насосах устранен такой



существенный недостаток, присущий ионно-геттерным насосам, как наличие накаливаемых элементов электродной системы.

Схема простейшего диодного магнитного электроразрядного насоса показана на рис. 7.41. Анод 1 насоса образован из отдельных разрядных ячеек, с открытых концов которых расположены общие катоды 2 из титана. Эта электродная система помещается в магнитное поле, перпендикулярное плоскости катодов. При подаче

Рис. 7.41. Схема диодного магнитного электроразрядного насоса с источником питания.

1 — анод; 2 — катод; R — балластное сопротивление; H — направление магнитного поля.

на электроды разности потенциалов в несколько киловольт в ячейках возникает газовый разряд, который благодаря магнитному полю поддерживается в широком диапазоне давлений. Положительные ионы газов, образующиеся в разряде при соударении электронов с молекулами, ускоряются электрическим полем в направлении катодов и внедряются в них, вызывая распыление материала катодов. Распыленный с катодов титан осаждается главным образом на аноде. Активные газы (азот, кислород), присутствующие в вакуумной системе.

попадая на свеженанесенную на аноды пленку, связываются на ней, образуя устойчивые химические соединения с титаном.

Образующиеся при реакциях устойчивые соединения — нитриды или окислы титана — могут возникать и на катоде в момент попадания туда ионов или молекул азота и кислорода. Однако из-за сильного распыления материала катода активные газы в конце концов оказываются в основном на аноде, оставаясь лишь на тех участках катода, которые почти не подвергаются ионной бомбардировке.

Многоатомные газы, пары воды, углекислый газ, аммиак, углеводороды, по-видимому, диссоциируют в разряде. Ионы осколков молекул также вызывают распыление материала катода.

Ионы легких газов (водород, дейтерий, гелий) не вызывают заметного распыления материала катода. Для них более существенным является второй механизм откачки: ионы легких газов, имеющие малые размеры, могут внедряться в материал катода и диффундировать в него. Таким образом, быстрота действия магнитного электроразрядного насоса зависит от рода газа или пара.

Первоначально относительно высокая быстрота действия насоса по этим газам постепенно уменьшается, особенно для гелия, не образующего с титаном твердых растворов. При бомбардировке материала катода ионами тяжелых газов или при нагреве его разрядом до температуры свыше 470 K наблюдается обратное выделение легких газов. Тяжелые инертные газы — аргон, криптон и ксенон — откачиваются благодаря адсорбции ионов катодам. Вследствие больших молекулярных размеров диффузия этих газов в катод затруднена, и первоначально высокая быстрота действия насоса по этим газам резко уменьшается. Поглощение этих газов происходит в основном на периферийных участках ячеек катодов, куда наносится титан, интенсивно распыляемый тяжелыми ионами из центральных частей ячеек катодов. При откачке аргона с давлением около 10^{-3} Па и при длительной откачке воздуха с давлением больше 10^{-3} Па, содержащего 1% аргона, наблюдаются резкие периодические повышения давления, называемые *аргонной нестабильностью*. Тем не менее присутствие аргона с парциальным давлением меньше 10^{-3} Па при

периодическом обезгаживании насоса оказывается полезным, так как при этом интенсифицируется распыление материала катода и увеличивается скорость откачки активных газов.

Таким образом, важной особенностью магниторазрядных насосов является своеобразная *авторегулировка скорости испарения материала катодов*, обеспечивающая экономное расходование материала и большой срок службы насоса. Поскольку ионный ток приблизительно пропорционален давлению, он часто используется для оценки давления в насосе и откачиваемом сосуде.

Простота устройства и возможность работы в любом положении также выгодно отличают магнитные электроразрядные насосы от других.

Для понимания работы магниторазрядных насосов, помимо различий в механизме поглощения различных газов, необходимо иметь в виду изменение характера газового разряда с изменением давления. При давлении 10^{-1} Па ток разряда велик вследствие большой электропроводности разрядного промежутка; чтобы разряд при этом не перешел в дуговой, ток разряда специально ограничивается (в малых насосах используется балластное сопротивление R , показанное на рис. 7.41, в крупных насосах используют более сложные электрические цепи), что приводит к уменьшению падения напряжения на разрядном промежутке. При этом уменьшается энергия ионов и, следовательно, резко снижается скорость распыления материала катодов. Поэтому быстрота действия насоса при высоких давлениях невелика, а относительно большой ток вызывает разогрев электродов и сильное газовыделение, вследствие чего давление в системе повышается. В этих условиях целесообразно продолжать откачку насосом предварительного разрежения до начала периода пуска, когда эффект откачки магнитным электроразрядным насосом становится заметным.

В период пуска, который может продолжаться от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от состояния и предыстории насоса, давление понижается от 1 до 10^{-2} Па и разряд принимает форму, характерную для высокого вакуума. Сопротивление разрядного промежутка увеличивается, ток уменьшается, и происходит рост анодного напряжения, что ведет к увеличению быстроты действия насоса. Период пуска за-

вершается относительно быстрым переходом в область высокого вакуума; ток продолжает уменьшаться пропорционально давлению, анодное напряжение и быстрота действия насоса достигают номинальных значений.

Конструкции и характеристики

Конструкции магниторазрядных насосов довольно разнообразны, что объясняется различиями в условиях их применения. В одних случаях от насоса требуется длительная работа в области предельно низких давлений, в других — насос должен использоваться в циклических производственных процессах с частыми пусками, в ряде случаев от магнитного электроразрядного насоса требуется повышенная эффективность откачки инертного газа и т. п.

Во всех отечественных магнитных электроразрядных насосах геометрические размеры ячейки примерно одинаковы и быстрота действия одной ячейки составляет примерно 1 л/с. Поэтому для получения высокой быстроты действия в насосах используется несколько электродных блоков, каждый из которых содержит большое количество ячеек.

Как отмечалось, недостатком магниторазрядных насосов является длительный период пуска. Кроме того, неохлаждаемые диодные магнитные электроразрядные насосы не могут длительно работать при давлениях больше 10^{-3} Па из-за перегрева электродов.

Этот недостаток устранен в диодных магнитных электроразрядных насосах с *водяным охлаждением анодов* электродного блока, что позволяет успешно запускать эти насосы при давлении меньше 5 Па и длительно работать при давлении 10^{-1} Па.

В насосах с водоохлаждаемым анодом в отличие от диодных неохлаждаемых насосов высокое отрицательное напряжение подается на катоды, изолированные от корпуса, а анод насоса заземлен. Серия магнитных электроразрядных насосов с охлаждаемыми анодами показана на рис. 7.42.

Состав остаточных газов в хорошо обезгаженной системе, откачиваемой магнитным электроразрядным насосом, состоит из обычно присутствующих во всех вакуумных системах водорода, азота, окиси углерода, аргона и метана.

Разработанные блоки питания к магнитным электроразрядным насосам имеют по мощности такие характе-

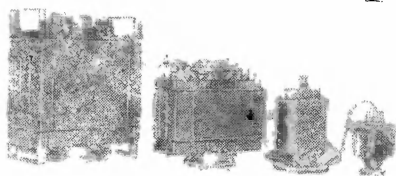


Рис. 7.42. Магнитные электроразрядные насосы с охлаждаемыми анодами.

ристики, при которых максимальная мощность выделяется при наибольших давлениях устойчивой работы. С увеличением мощности блока питания возрастает быстрота действия насоса в области высоких давлений, но одновременно возрастают габариты и масса источника питания, тепловыделение на электродах насоса и возникает опасность возникновения дугового разряда между электродами. В связи с этим обычно разрядный ток для диодных неохлаждаемых насосов, приходящийся на одну ячейку, ограничивают сверху 0,5 мА, для охлаждаемых диодных насосов — 3 мА и триодных насосов — 4 мА.

Практические указания по эксплуатации

Поскольку состояние внутренних поверхностей магнитного электроразрядного насоса оказывает решающее влияние на его работоспособность, нельзя допускать попадания в насос загрязнений. При кратковременных вскрытиях на атмосферу вакуумной системы с магнитным электроразрядным насосом желательно заполнять ее осушенным воздухом или азотом для предотвращения попадания в насос влаги; в вакуумных системах, длительное время соприкасающихся с атмосферным воздухом, желательно иметь кран между насосом и системой. Совершенно недопустима предварительная откачка вакуумной системы насосами с масляным уплотнением, не защищенными надежной ловушкой, так как это приводит к загрязнению вакуумной системы и магнитного электроразрядного насоса углеводородами. Лучше всего для этой цели использовать адсорбционные насосы. После кратковременного вскрытия на атмосферу чистой

установки с работающим магниторазрядным насосом время пуска в небольших системах не превышает несколько минут, в крупных около 30 мин. У нового, еще не работавшего или загрязненного насоса время пуска значительно больше за счет сильного газовыделения с поверхностей.

Улучшить характеристики насоса в области низких давлений можно путем аргонной обработки. Для этого в работающий магнитный электроразрядный насос через нагнетатель впускается до давления $5 \cdot 10^{-1}$ —5 Па аргон, одновременно откачиваемый вспомогательным насосом. Продолжительность аргонной обработки — около 1 ч. Интенсивное ионное распыление при аргонной обработке создает на электродах свеженапыленные слои титана, не содержащие сорбированных газов, одновременно происходит обезгаживание насоса прогревом энергией, выделяющейся на электродах. После аргонной обработки насос быстро достигает низких давлений. Следует иметь в виду, что длительная работа насоса при высоких давлениях (порядка 1 — 10^{-1} Па) создает условия для попадания проводящего слоя титана на изоляторы и приводит к замыканиям в электродной системе. Запуск магнитного электроразрядного насоса значительно облегчается при понижении начального давления до значений ниже 10^{-1} Па.

При сильном загрязнении тяжелыми углеводородами (парами масла) выход насоса на рабочий режим может оказаться невозможным. Наиболее простым способом восстановления такого насоса является прогрев его до температуры около 700 К на воздухе (или в окислительной атмосфере) для разложения углеводородов. При этом на титане образуются пленки окислов, и период пуска затягивается. При переборке насоса титановые и стальные детали подвергают механической очистке, травлению в кислотах, промывают растворителями и водой и сушат в чистом теплом воздухе. Насос следует собирать в чистых условиях и как можно быстрее запустить в работу, подвергнув предварительно прогреву при температуре около 700 К под откачкой адсорбционным, турбомолекулярным или пароструйным диффузионным насосом с надежной ловушкой.

Долговечность насоса, определяемая обычно местным разрушением катодов, очень велика и составляет десятки тысяч часов при работе на давлениях меньше 10^{-4} Па.

В случае откачки больших количеств водорода долговечность насоса может сильно уменьшиться из-за коробления катодов (в результате насыщения водородом) и замыкания электродной системы. При этом необходима смена катодов.

Замыкание электродов может произойти также из-за отслаивания пленки титана с анода после длительной работы насоса.

7.13. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия

При температурах, близких к температуре жидкого водорода или гелия, большинство веществ имеет весьма низкую упругость паров. Так, при температуре, близкой к точке кипения водорода, давление насыщенных паров O_2 составляет 10^{-11} Па, N_2 и CO — 10^{-9} Па, а Ag — 10^{-15} Па.

При температуре, близкой к точке кипения гелия, упругость насыщенного пара H_2 составляет 10^{-4} Па, а Ne — 10^{-17} Па.

Поверхность, заключенная в герметичный сосуд и охлажденная до температур, близких к точке кипения водорода, будет конденсировать молекулы всех газов, за исключением He , H_2 и Ne .

При охлаждении поверхности до температуры, близкой к точке кипения гелия, на ней будут конденсироваться молекулы всех газов, кроме гелия.

Конструкции и характеристики

По принципу конденсации газов поверхностью, охлажденной до точки кипения водорода (20,4 К), выполнен водородный конденсационный насос, чертеж которого изображен на рис. 7.43. Основным элементом насоса является медный сосуд 9, заполняемый жидким водородом. Для уменьшения теплопритока от окружающих стенок сосуд окружен цилиндрическим медным экраном 8, охлаждаемым жидким азотом. Задний экран с впаянной азотной ловушкой 2 также охлаждается жидким азотом.

Для откачки не конденсирующихся при температуре жидкого водорода газов (водород, гелий, неон) и создания предварительного разрежения насос снабжен паромасляным диффузионным насосом 7.

Для предотвращения попадания паров масла и продуктов его разложения из насоса 7 предусмотрены водяная ловушка 6 и жалюзийная азотная ловушка 4. Жидкий азот для охлаждения экранов и ловушки подается из сосудов Дьюара 1 и 13.

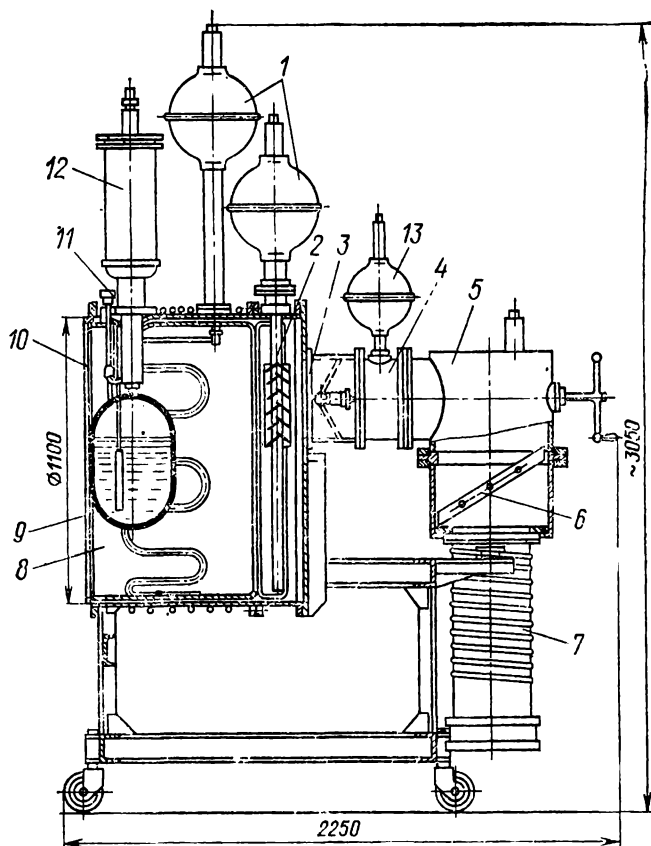


Рис. 7.43. Водородный конденсационный насос.

1, 13 — сосуды Дьюара; 2, 4 — азотные ловушки; 3 — кран; 5 — переходник; 6 — водяная ловушка; 7 — пароструйный диффузионный насос; 8 — экран; 9 — медный сосуд; 10 — корпус; 11 — дросселирующий кран; 12 — охладитель.

Питание насоса жидким водородом осуществляется от автономного охладителя 12.

В последнее время все большее распространение получают конденсационные насосы, в которых для охлаждения поверхностей используют газовые холодильные машины — криогенераторы.

На рис. 7.44 показан конденсационный насос с криогенератором, работающим по так называемому обращенному циклу Стирлинга.

В корпусе насоса 14 размещена криопанель 10, изготовленная из медной пластины и являющаяся откачивающим элементом насоса. Криопанель 10 имеет хороший тепловой контакт со второй ступенью машины. Для снижения теплопритока к криопанели 10 со стороны теплых стенок насоса и откачиваемого сосуда предусмотрен жалюзийный экран 11, который имеет хороший тепловой контакт с первой ступенью машины 7. Температура экрана 11 поддерживается на уровне 90—100 К.

В картере 1 размещены компрессорный поршень 18 и шатуны привода, сидящие на эксцентриковых втулках 2

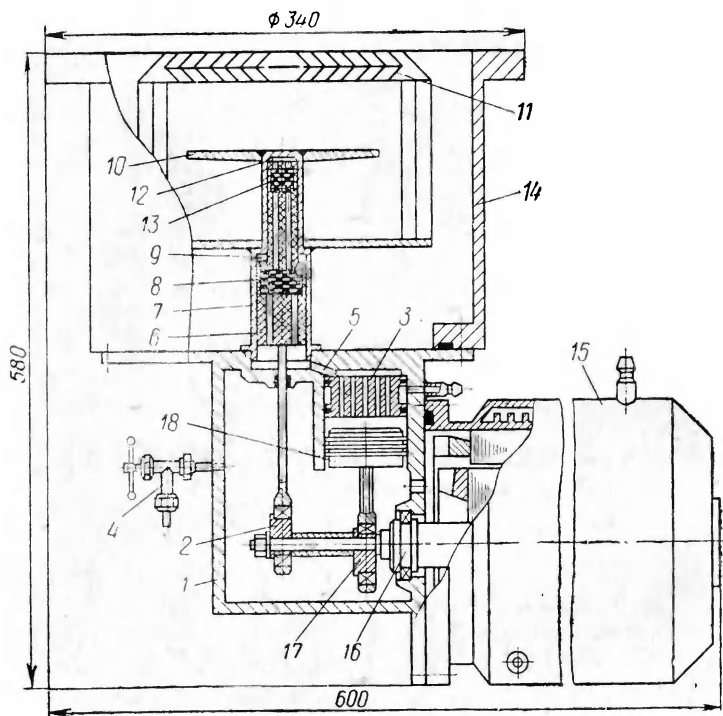


Рис. 7.44. Конденсационный насос со встроенным криогенератором.
1 — картер; 2, 17 — эксцентриковые втулки; 3 — водяной холодильник; 4 — кран; 5 — канал; 6 — дифференциальный вытеснитель; 7 — цилиндр; 8, 13 — регенераторы; 9 — полость расширения первой ступени; 10 — криопанель; 11 — жалюзийный экран; 12 — полость расширения второй ступени; 14 — корпус насоса; 15 — электродвигатель; 16 — вал; 18 — компрессорный поршень.

и 17 вала 16 встроенного электродвигателя 15. Картер 1 криогенератора через кран 4 заполняется газообразным гелием под давлением $(16—20) \cdot 10^5$ Па.

Криогенератор работает следующим образом. Газ, сжатый компрессорным поршнем 18 до давления $(35—40) \cdot 10^5$ Па, поступает в водяной холодильник 3, где отводится теплота сжатия. Затем газ по каналу 5 проходит через сетчатый регенератор 8, расположенный в вытеснителе. Часть газа поступает в полость расширения 9 первой ступени, а другая часть, пройдя регенератор 13, поступает в полость расширения 12 второй ступени.

При движении вытеснителя вниз происходят расширение газа в обеих ступенях и его охлаждение. В описываемой конструкции хладопроизводительность первой ступени составляет примерно 10 Вт при 100 К, а второй ступени примерно 4 Вт при 25 К.

Одним из главных недостатков конденсационных насосов, использующих встроенные криогенераторы, является пока еще малая длительность непрерывной работы, составляющая всего 500—1000 ч. Удельная быстрота откачки и предельное остаточное давление конденсационных насосов могут быть рассчитаны на основе баланса потоков газа, конденсирующегося на холодной поверхности и испаряющегося с нее.

Быстрота действия современных конденсационных насосов достигает 10^5 л/с и более, а предельное остаточное давление составляет менее 10^{-7} Па.

7.14. КРИОСОРБЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Основным отличием криосорбционных насосов от конденсационных, описанных выше, является способность путем криосорбции откачивать низкокипящие газы (гелий, водород), обеспечиваемая применением адсорбентов, охлаждаемых до сверхнизких (криогенных) температур. В качестве адсорбента в криосорбционных насосах могут использоваться цеолиты, активированный древесный уголь, пористый никель, оксидная пленка алюминия и другие материалы. По конструкции криосорбционные насосы мало отличаются от конденсационных. При полном насыщении адсорбента газом криосорбционный насос становится конденсационным, однако при низких давлениях ($10^{-4}—10^{-5}$ Па) он способен сотни и даже тысячи часов работать без использования вспомога-

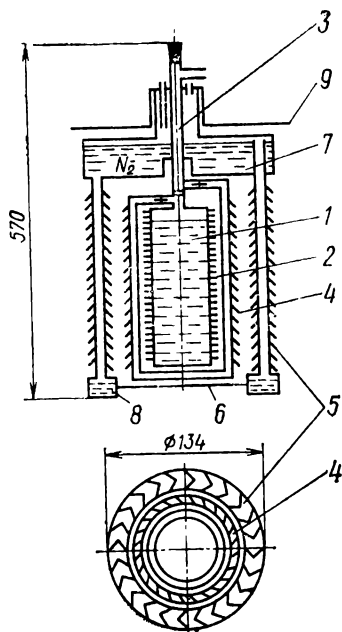


Рис. 7.45. Схема криосорбционного заливного гелиевого насоса.

ного насоса для откачки низкокипящих газов.

На рис. 7.45 показана схема криосорбционного заливного насоса, состоящего из цилиндрического сосуда 1 с ребрами 2. Цилиндрический сосуд 1 изготовлен из алюминиевого сплава АД1, на поверхности которого анодным окислением создана высокопористая оксидная пленка алюминия толщиной 120—150 мкм, являющаяся сорбентом. Оксидная пленка алюминия обладает большой сорбционной емкостью, имеет большую теплопроводность и высокую механическую прочность.

Внутри сосуда 1 с помощью переливного устройства, вводимого в горловину 3, заливается жидкий гелий. Ребра 2 служат для увеличения геометрической поверхности сорбента, за счет чего повышается сорбцион-

ная емкость. С целью снижения теплопритока сосуд 1 защищен жалюзийным экраном 4, который охлаждается испаряющимся газообразным гелием. В свою очередь экран 4 окружен жалюзийным экраном 5 и глухим экраном 6, которые охлаждаются жидким азотом, находящимся в резервуарах 7 и 8. Такая система промежуточных экранов обеспечивает дифференциальную откачку отдельных компонентов газа на различных температурных уровнях, что позволяет более рационально использовать емкость сорбента, нанесенного на сосуд 1. Действительно, при откачке сосуда вначале конденсируются углекислый газ и пары воды на экранах 5 и 6, температура которых поддерживается в пределах 78—90 К, а затем на экране 4, охлажденном до 25—30 К, происходит конденсация всех остальных газов, кроме гелия, водорода и неона, и, наконец, на ребрах 2 сосуда 1, имею-

ших температуру около 4,2 К, сорбируются эти низкокипящие газы, а также та часть других газов, которые не сконденсировались на экранах 4, 5 и 6.

Криосорбционный насос целесообразно устанавливать непосредственно внутри откачиваемого сосуда, для чего предусмотрен фланец 9. Предельное остаточное давление, создаваемое криосорбционным насосом, после предварительного обезгаживания цилиндрического сосуда 1 при температуре 420 К составляет $1 \cdot 10^{-9}$ Па.

⁴ Несмотря на относительную простоту конструкции, криосорбционные заливные насосы обладают существенными недостатками, состоящими в необходимости периодической заливки жидкого гелия и азота, трудности автоматизации и контроля наличия хладагентов, а также в необходимости транспортировать жидкий гелий и собирать дорогостоящий газ. Для сбора испаряющегося в насосе гелия применяют мягкий газгольдер, откуда компрессором гелий перекачивают в стандартный баллон с давлением $15 \cdot 10^6$ Па.

С целью упрощения эксплуатации современные криосорбционные насосы снабжаются встроенными криогенераторами.

Глава восьмая

ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

При изготовлении и эксплуатации вакуумных насосов возникает необходимость в проверке основных эксплуатационных параметров. Как уже упоминалось в гл. 6, к таким параметрам относят *быстродействие, предельное остаточное давление, наибольшее давление запуска и наибольшее выпускное давление*. Измерения параметров обычно проводят на испытательной установке, которая содержит, кроме испытываемого насоса, измерительную камеру, средства измерения давления и потока газа, масс-спектрометрические датчики и необходимую коммутирующую аппаратуру.

Для унификации условий измерения измерительная камера всегда выбирается определенных размеров (рис. 8.1, 8.2). Так, диаметр измерительной камеры рекомендуется брать для большинства типов насосов (кроме механических и адсорбционных) равным диаметру входного отверстия насоса, но не менее 100 мм. При входных отверстиях, меньших 100 мм, между камерой и насосом устанавливают переходник.

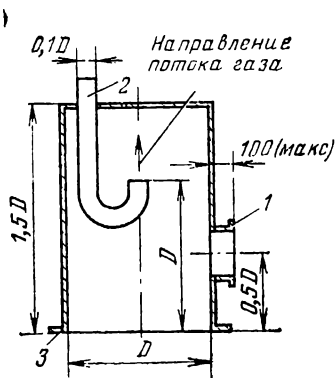


Рис. 8.1. Схема измерительной камеры для механических вакуумных насосов.

1 — фланец для присоединения манометрического преобразователя или масс-спектрометра; 2 — напускная трубка; 3 — фланец для подсоединения испытуемого насоса.

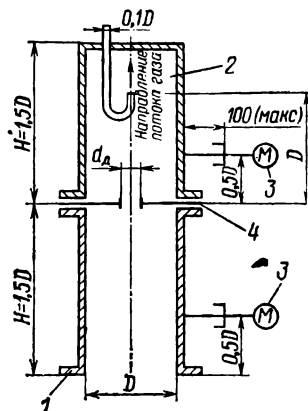


Рис. 8.2. Схема установки для измерения быстроты действия высоковакуумных насосов.

1 — измерительная камера; 2 — напускная камера; 3 — манометрический преобразователь; 4 — диафрагма.

8.1. ИЗМЕРЕНИЕ БЫСТРОТЫ ДЕЙСТВИЯ НАСОСОВ

Хотя известно много экспериментальных методов измерения быстроты действия насосов, в промышленности и лабораторной практике рекомендован метод, при котором измеряют поток газа, напускаемого в измерительную камеру, и затем по соответствующим соотношениям определяют быстроту действия насоса. В зависимости от ожидаемой производительности насоса применяют различные методы измерения потока газа (см. гл. 12).

При измерении быстроты действия *механических вакуумных насосов* измерительная камера (рис. 8.1) должна иметь объем не менее пяти объемов всасывания за один оборот ротора насоса, т. е.

$$V_K \geq 5V_{вс} \geq 5 \frac{S_n}{n/60} \quad 300 \frac{S_n}{n}, \quad (8.1)$$

где V_K — объем измерительной камеры, л;

$V_{вс}$ — объем всасывания за один оборот ротора насоса, л;

S_n — ожидаемая быстрота действия насоса, л/с;

n — частота вращения ротора, об/мин.

Измерение быстроты действия проводят *методом постоянного давления*. Для этого измерительную камеру откачивают до давления $0,1p_n$ (p_n — давление, при котором требуется измерить быстроту действия). Затем с помощью натекателя напускают в измерительную камеру газ до установления давления p_n и измеряют при этом одним из способов (см. гл. 12) поток напускаемого газа Q'_n . Так, если поток газа лежит в пределах от 1000 до $0,10 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, для его измерения применяют *ротаметры*, если в пределах от 2 до $1,0 \times$

$\times 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ — измерительные бюретки, и, наконец, при потоках газа меньше $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ измеряют поток методом *калиброванной диафрагмы и двух манометрических преобразователей*.

По формуле (6.2) вычисляют быстроту действия насоса при данном давлении p_n . Устанавливая натекателем различные давления p_n в измерительной камере и измеряя при этом поток напускаемого газа, снимают таким образом зависимость быстроты действия насоса от впускного давления $S_n = f(p_n)$. При испытаниях *газобалластных* насосов проводят измерение быстроты действия с закрытым и открытым газобалластным устройством.

Измерение быстроты действия насосов других типов осуществляется *аналогичным образом*.

При определении характеристик *адсорбционных* насосов вместо быстроты действия обычно находят *максимальный объем* $V_{\text{макс}}$, откачиваемый адсорбционным насосом от давления 10^5 Па до давления $1,33 \text{ Па}$ за установленное время.

8.2. ИЗМЕРЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ОСТАТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ

У насосов объемного действия обычно измеряют *полное предельное остаточное давление газов и паров*. Для этого производят откачку измерительной камеры (см. рис. 8.1) до тех пор, пока в ней не установится так называемое *равновесное давление, которое затем в течение следующих 3 ч изменится не более чем на 10%*. Это установившееся равновесное давление и принимают за предельное остаточное давление насоса.

Измерение предельного остаточного давления газов у насосов других типов производится *аналогичным образом*, с той лишь разницей, что применяют измерительную камеру, изображенную на рис. 8.2, и до измерений проводят обезгаживание насоса (если это предусмотрено его конструкцией) и измерительной камеры прогревом при температуре $600\text{—}700 \text{ К}$ в течение $12\text{—}24 \text{ ч}$. За предельное остаточное давление в этом случае принимают давление, полученное через 24 ч после выключения прогрева.

Следует подчеркнуть, что во избежание ошибки в измерении предельного остаточного давления проводимость трубопровода, соединяющего измерительную камеру с манометрическим преобразователем, должна быть не менее 50 л/с . Предпочтительней, однако, использовать манометрические преобразователи открытого типа.

8.3. ИЗМЕРЕНИЕ НАИБОЛЬШЕГО ВЫПУСКНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ДАВЛЕНИИ, СООТВЕТСТВУЮЩЕМ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Измерение наибольшего выпускного давления производят при испытаниях *эжекторных, бустерных и высоковакуумных диффузионных насосов и агрегатов*.

Для измерения наибольшего выпускного давления откачивают измерительную камеру до давления τ 10 раз меньшего, чем давление, при котором производительность насоса максимальная. С помощью натекателя, установленного в измерительной камере, увеличивают давление до значения, соответствующего максимальной производительности насоса. Затем натекателем, установленным на ма-

гистралли, соединяющей выпускной патрубков насоса с насосом предварительного разрежения, напускают газ до тех пор, пока давление в измерительной камере не возрастет на 50% ранее достигнутого давления. Давление, измеренное в этот момент на выпускном патрубке насоса, принимают за *наибольшее выпускное давление*.

Глава девятая

ЛОВУШКИ

9.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЛОВУШКАМ

Ловушки представляют собой устройства, предназначенные для улавливания паров или газов с целью предотвращения или уменьшения их проникновения из одной части вакуумной системы в другую. Так, при откачке сосудов паротутным диффузионным насосом, из которого поступают в вакуумную систему пары ртути, имеющие давление насыщения 0,1 Па, для получения более высокого вакуума прибегают к интенсивной их конденсации (вымораживанию) при помощи ловушек с охлаждающими веществами (хладагентами).

При необходимости измерения парциального давления газа или для получения так называемого чистого, безмасляного вакуума при откачке пароструйными масляными насосами применяют ловушки, исключющие или уменьшающие проникновение в вакуумную систему обратного потока паров рабочей жидкости из насоса.

Обратным потоком называют поток паров рабочей жидкости, который проступает из насоса в откачиваемый сосуд. Обычно обратный поток определяется как масса пара рабочей жидкости, поступающей в откачиваемый сосуд за единицу времени с единицы поверхности входного отверстия насоса, и выражается в $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Основными техническими параметрами ловушки являются ее *защитная способность и удельная проводимость*.

Защитной способностью ловушки $\beta_{\text{лов}}$ называется отношение массовых потоков паров рабочей жидкости, поступающих из насоса в откачиваемый сосуд с ловушкой и без нее.

Часто качественное сравнение ловушек разных типов производят не по отношению $\beta_{\text{лов}}$, а по обратному потоку паров рабочей жидкости.

Удельной проводимостью ловушек $U_{\text{уд.лов}}$ называется отношение проводимости ловушки $U_{\text{лов}}$ к площади ее входного отверстия A :

$$U_{\text{уд.лов}} = U_{\text{лов}}/A. \quad (9.1)$$

При конструировании ловушек в зависимости от их назначения к ним предъявляется ряд требований, основные из которых перечислены ниже.

1. Ловушки должны хорошо защищать откачиваемый сосуд от проникновения паров рабочей жидкости, т. е. должны обладать максимальной защитной способностью.

2. Ловушки должны как можно меньше снижать быстроту действия насоса. Правильно сконструированная ловушка снижает быстроту действия насоса не больше, чем на 30—40%.

Такая ловушка имеет $U_{\text{уд.лов}} = 3+4 \text{ л/(с}\cdot\text{см}^2)$. Это означает, например, что ловушка с $U_{\text{уд.лов}} = 3,5 \text{ л/(с}\cdot\text{см}^2)$, будучи смонтированной в трубопроводе с диаметром проходного сечения, равным 100 мм, уменьшает быстроту действия пароструйного насоса, имеющего $S_E = 100 \text{ л/с}$, примерно на 30%.

Действительно, из формулы (9.1) видно, что

$$U_{\text{лов}} = 3,5 \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \approx 273 \text{ л/с}, \quad (9.2)$$

и эффективная быстрота откачки

$$S_0 = \frac{100 \cdot 273}{273 + 100} \approx 73 \text{ л/с} \quad (9.3)$$

3. Ловушки должны иметь конструкцию, обеспечивающую легкий доступ к защитным элементам для их периодической очистки.

4. Ловушки, применяемые в сверхвысоковакуумных системах, должны допускать прогрев до 750 К с целью обезгаживания.

5. Конструкции охлаждаемых ловушек должны обеспечивать малый расход хладагента.

Основные типы ловушек, нашедшие широкое применение в вакуумной технике, приведены в табл. 9.1.

Основные типы вакуумных ловушек

Тип ловушек	Наименование ловушки	Принцип действия	Минимальный обратный поток паров рабочей жидкости марки ВМ-5, кг/(м ³ ·с)	Применение
Механические	Водоохлаждаемая механическая ловушка Маслоотражатель	Конденсация молекул на охлаждаемых водой защитных элементах	$1,4 \cdot 10^{-8}$ — $1,4 \cdot 10^{-9}$ $2,8 \cdot 10^{-7}$ — $5,6 \cdot 10^{-8}$	Механическая ловушка применяется обычно с маслоотражателем Чаще всего в виде охлаждаемого водой колпачка, устанавливаемого над верхним соплом паромасляного диффузионного насоса
	Фильтр из пористого материала	Капиллярная адсорбция паров рабочей жидкости (см. § 3.2)	$2,8 \cdot 10^{-11}$ — $1,4 \cdot 10^{-10}$	В форвакуумных системах с механическими насосами с масляным уплотнением
Низкотемпературные охлаждаемые	Ловушки с хладагентом	Конденсация паров рабочей жидкости на защитных элементах, охлаждаемых жидким азотом	$2,8 \cdot 10^{-11}$ — $2,8 \cdot 10^{-12}$	В высоковакуумных и сверхвысоковакуумных системах с паромасляными и парогутными насосами для надежной защиты откачиваемого сосуда от паров рабочей жидкости. В высоковакуумных системах с паромасляными диффузионными насосами
	Ловушки с автономным микроохладителем		$(2,2—8,3) \cdot 10^{-11}$	

Тип ловушек	Наимено ловушек	Принцип действия
Адсорбционные	Адсорбционные высоко-вакуум- ные	Избирательная сорбция углеводородов и других высокомолекулярных со- единений
	Адсорбционные низковакуумные	
Электриче- ские	Ионные	Образование твердых по- лимеризованных частиц, осаждающихся на кор- пусе ловушек

Продолжение табл. 9.1

Минимальный обратный поток паров рабочей жидкости марки ВМ-5, кг/(м²·с)	Применение
$2,8 \cdot 10^{-12}$ $2,0 \cdot 10^{-11}$	В высоковакуумных и сверхвысоко- вакуумных системах с паромасляны- ми диффузионными насосами. Облада- ют значительно меньшей удельной проводимостью по сравнению с ме- ханическими и низкотемпературными охлаждаемыми ловушками. В форвакуумных системах с ме- ханическими насосами с масляным уплотнением
—	В форвакуумных системах с механи- ческими насосами с масляным уп- лотнением

9.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ

В качестве механических ловушек чаще всего используют водоохлаждаемую ловушку, маслоотражатель и фильтр из пористых материалов.

Водоохлаждаемые механические ловушки. Во многих случаях при работе с паромасляными диффузионными насосами, использующими рабочие жидкости с достаточно низким давлением насыщенных паров, для уменьшения обратного потока довольствуются тем эффектом, который получается от конденсации молекул на защитных элементах механических ловушек, охлаждаемых проточной водой.

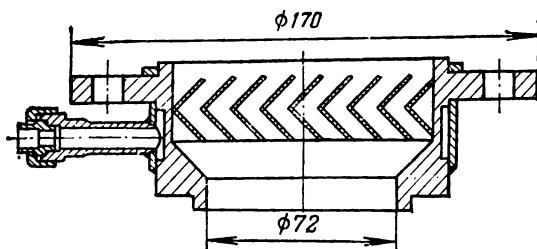


Рис. 9.1. Водоохлаждаемая механическая ловушка.

Для осуществления откачки через ловушку защитные элементы располагаются с некоторым зазором друг относительно друга, но таким образом, чтобы создавалась *оптически плотная конструкция*, т. е. чтобы из плоскости выходного отверстия ловушки ни под каким углом не просматривалось ее входное отверстие.

Известно большое количество конструкций механических ловушек.

В качестве примера на рис. 9.1 приведена простейшая конструкция водоохлаждаемой механической ловушки. Ловушка проста в изготовлении и имеет сравнительно большую удельную проводимость. Защитные элементы этой ловушки выполнены в виде уголково-шевროнов с углом при вершине 90° , размещенных параллельно друг другу в корпусе.

Маслоотражатель. Конструкция маслоотражателя в виде охлаждаемого водой колпачка показана на рис. 9.2. Маслоотражатель служит для предотвращения попадания паров рабочей жидкости из струи высоковаку-

умного сопла пароструйного диффузионного насоса в откачиваемый сосуд.

Обычно такие маслоотражатели уменьшают поток паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый сосуд в 10^2 — 10^3 раз.

Фильтры из пористых материалов. Фильтры служат для уменьшения потока паров рабочей жидкости, проникающих в вакуумную систему из механических насосов с масляным уплотнением. В качестве малоулавливающих фильтров могут использоваться пористые никель, фторопласт или нержавеющая сталь. Наиболее подходящим материалом для этой цели является пористая нержавеющая сталь с размерами пор (капиллярами) от 4 до 20 мкм. Механизм улавливания молекул рабочей жидкости заключается в сорбции молекул на стенках капиллярных каналов фильтра, благодаря чему обратный поток паров масла за фильтром уменьшается в 10^6 раз.

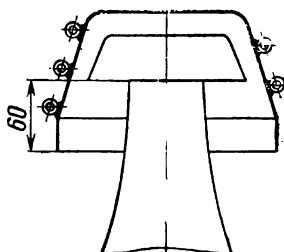


Рис. 9.2. Маслоотражатель в виде охлаждаемого водой колпачка, помещенный над верхним соплом пароструйного насоса.

На рис. 9.3 показан фильтр, представляющий собой съемный элемент, который располагается между отка-

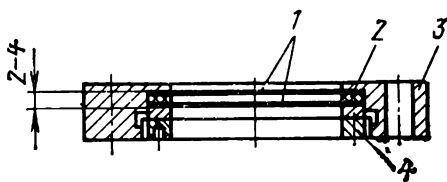


Рис. 9.3. Фильтр из пористого материала.

чиваемым сосудом и насосом. В корпусе фильтра 3 установлены две перегородки 1, изготовленные из пористой нержавеющей стали, разделенные прокладкой 2 из маслостойкой резины или фторопласта, которые поджимаются гайкой 4. Удельная проводимость перегородки при толщине 0,5 мм составляет $0,02 \text{ л}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Для сохранения необходимой проводимости диаметр перегородок 1

обычно делают вдвое больше диаметра впускного отверстия механического насоса.

При длительной работе фильтра в области низких давлений в капиллярах перегородки накапливается рабочая жидкость механического насоса. Поэтому для сохранения эффективности работы фильтра необходимо периодически производить прокачку газа через него, начиная с атмосферного давления. При этом происходит освобождение пор от рабочей жидкости и фильтр очищается.

В случае длительной работы фильтра при низких давлениях без прокачки газа его эффективность сохраняется всего 300 ч, после чего его необходимо промыть в органическом растворителе и просушить.

9.3. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОХЛАЖДАЕМЫЕ ЛОВУШКИ

Ловушки с хладагентом. Ловушки, охлаждаемые до низких температур, не только более надежно предотвращают проникновение паров рабочей жидкости в откачиваемый сосуд, но и улавливают пары и газы, имеющиеся в откачиваемом сосуде, тем самым снижая давление в нем.

Так, например, если поместить в герметичный сосуд резервуар с жидким азотом; то через некоторое время в сосуде установится давление, определяющееся упругостью паров наиболее летучего из имеющихся там веществ при температуре жидкого азота (см. § 5.3).

В отечественной промышленности для охлаждения ловушек чаще всего применяют жидкий азот. Для конденсации и вымораживания паров рабочей жидкости в стеклянных вакуумных установках широко применяются ловушки, изготовленные из стекла.

Ловушка, изображенная на рис. 9.4,а, предназначена для работы со стеклянным сосудом Дьюара, в который погружают ее цилиндрическую часть. В ловушке, показанной на рис. 9.4,б, жидкий азот наливают непосредственно во внутреннюю шаровидную полость. На рис. 9.5 представлена широко распространенная конструкция жалюзийной ловушки, также охлаждаемой жидким азотом. Защитные элементы 3 жалюзийных ловушек малых габаритов (с условным проходом до 160 мм) охлаждаются с помощью медного хладопровода 2, погружаемого в сосуд Дьюара 4 с жидким азотом.

Охлаждение больших ловушек производится с помощью азотного питателя, который автоматически подает жидкий азот из сосуда Дьюара в полость хладопротода.

Как уже отмечалось, важной эксплуатационной характеристикой, определяющей экономичность ловушки, является расход хладагента.

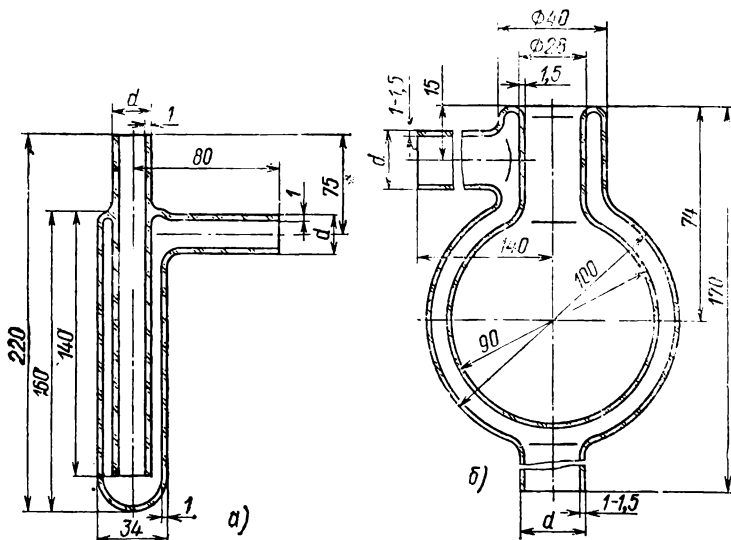


Рис. 9.4. Стекло́нные азотные ловушки.

а — применяется с сосудом Дьюара; *б* — заливная.

Расход хладагента в единицу времени в охлаждаемых ловушках зависит от притока тепла от стенок корпуса ловушки и сопла пароструйного насоса к ее охлаждаемым поверхностям. Существенную роль играет приток тепла в местах соединения охлаждаемых элементов ловушки с ее корпусом.

Снижение расхода хладагента может быть достигнуто путем охлаждения корпуса ловушки водой и установкой водоохлаждаемых экранов между горячим соплом насоса и охлаждаемыми элементами ловушки. Для снижения притока тепла в местах соединения охлаждаемых элементов ловушки с ее корпусом применяют тепловые развязки, выполненные в виде зазоров или переходов из материалов с большим тепловым сопротивлением. Так,

например, трубопровод для заливки ловушки хладагентом чаще всего изготавливают из тонкостенной трубки из ковра или нержавеющей стали.

Следует отметить, что через зазоры тепловых развязок может проникать в откачиваемый сосуд значительное количество паров масла из пароструйного диффузи-

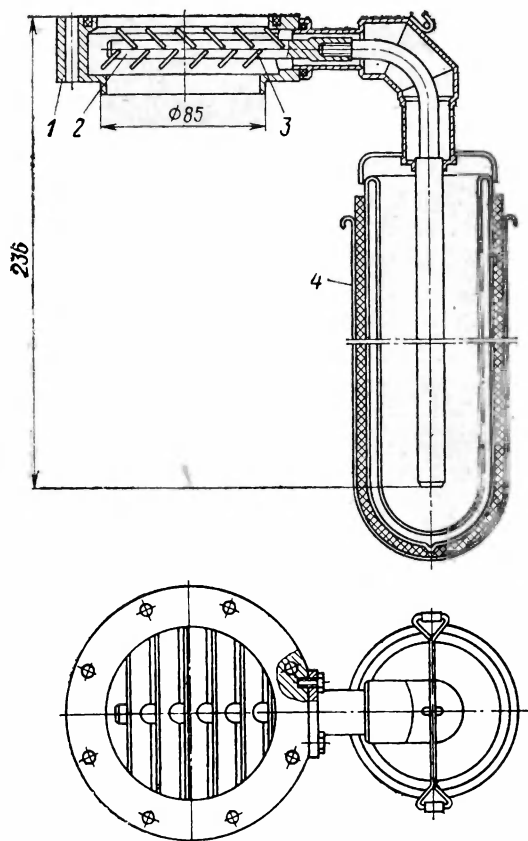


Рис. 9.5. Жалюзийная азотная ловушка.

1 — корпус; 2 — медный хладопровод; 3 — медные защитные элементы; 4 — сосуд Дьюара.

онного насоса. Кроме того, масло может мигрировать непосредственно по внутренней поверхности неохлаждаемой стенки ловушки.

Для исключения попадания масла в откачиваемый сосуд подобными путями применяют так называемые *ан-*

тимиграционные барьеры, две схемы которых показаны на рис. 9.6.

Антимиграционные барьеры практически не снижают проводимость ловушки и достаточно надежно предотвращают миграцию рабочей жидкости в откачиваемый сосуд при длительной работе ловушки.

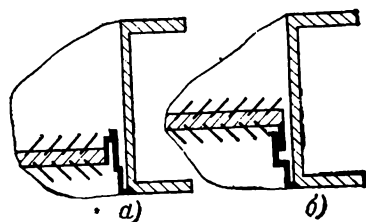


Рис. 9.6. Антимиграционные барьеры.

а — неразборный; б — разборный.

Низкотемпературные ловушки с автономным микроохладителем. На рис. 9.7 показана принципиальная схема ловушки с автономным микроохладителем, работающим по холодильному циклу с адиабатическим расшире-

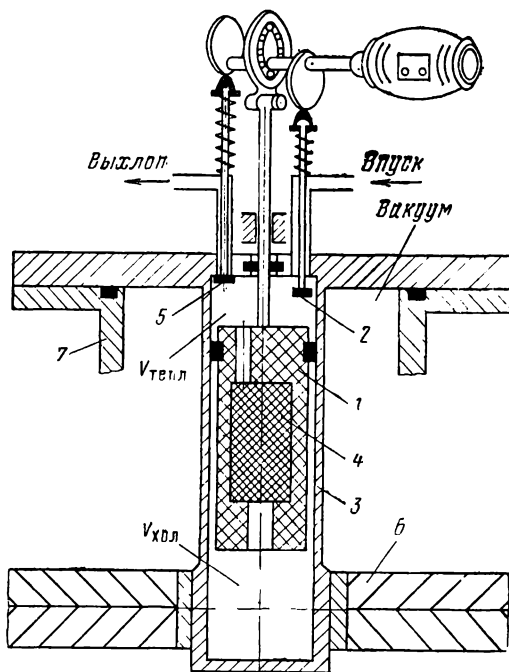


Рис. 9.7. Принципиальная схема ловушки с автономным микроохладителем.

1 — поршень-вытеснитель; 2 — впускной клапан; 3 — тонкостенный цилиндр; 4 — регенератор-теплообменник; 5 — выпускной клапан; 6 — защитные элементы ловушки; 7 — корпус.

нием сжатого воздуха без совершения работы, называемым циклом Гиффорда-Мак-Магона.

Работа микроохладителя ловушки происходит следующим образом. В тот момент, когда поршень-вытеснитель 1 находится в крайнем нижнем положении, воздух с давлением $(3-6) \cdot 10^5$ Па поступает через выпускной клапан 2 в цилиндр 3 и заполняет объем $V_{\text{тепл}}$ над поршнем-вытеснителем. При движении поршня-вытеснителя 1 вверх воздух через регенератор-теплообменник 4 перемещается в объем $V_{\text{хол}}$.

Регенератор-теплообменник 4 представляет собой цилиндрическую полость внутри поршня-вытеснителя, заполненную слоями латунной сетки. Воздух, проходя через регенератор-вытеснитель, охлаждается, отдавая тепло холодной насадке регенератора.

При подходе поршня-вытеснителя к крайнему верхнему положению закрывается клапан 2 и открывается выпускной клапан 5. Давление воздуха падает, и вследствие его расширения происходит понижение температуры воздуха. Полученный холод передается головке цилиндра 3, с которым через хороший тепловой контакт соединены защитные элементы 6 ловушки.

Расширяющийся и охлаждающийся воздух проходит через регенератор в обратном направлении и охлаждает насадку регенератора. При движении поршня-вытеснителя 1 вниз оставшийся в холодном объеме воздух вытесняется через выпускной клапан 5 в атмосферу. Затем цикл вновь повторяется. Холодопроизводительность описанного микроохладителя при температуре 170 К составляет примерно 15 Вт при расходе воздуха $2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и диаметре поршня-вытеснителя 45 мм с ходом 40 мм.

9.4. АДсорбЦИОННЫЕ ЛОВУШКИ

Несмотря на то, что охлаждаемые ловушки обеспечивают достаточно надежную защиту откачиваемого сосуда от попадания паров рабочей жидкости, их несомненным недостатком является необходимость в постоянной подаче охлаждающего вещества (хладагента).

Высокая адсорбционная способность некоторых пористых веществ — *адсорбентов* (цеолита, активной окиси алюминия, активированного древесного угля) по отношению к парам масла дает возможность создавать эффективные ловушки.

Высоковакуумные адсорбционные ловушки. На рис. 9.8 изображена высоковакуумная адсорбционная ло-

вушка, в которой в качестве адсорбента используется активная окись алюминия. Втулки 1 из активной окиси алюминия надеты на медные стержни 2, впаянные в охлаждаемые водой стенки корпуса ловушки. Регенерация ловушки осуществляется прогревом до температуры 600 К с помощью нагревателя 3. Вследствие значительной теплопроводности медных стержней 2 резко сокра-

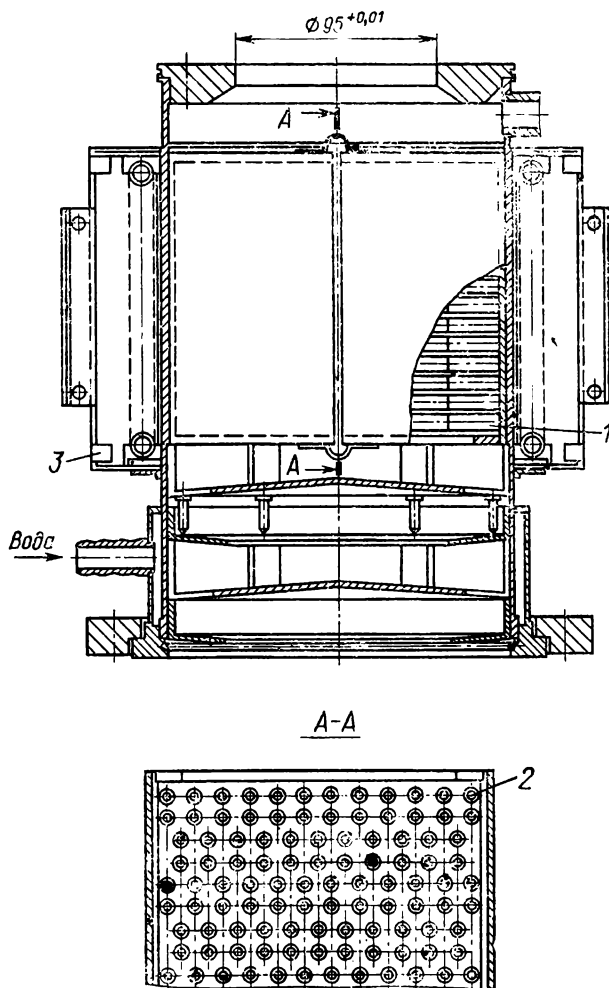


Рис. 9.8. Высоковакуумная адсорбционная ловушка.

щены затраты времени на нагрев при регенерации и последующее охлаждение. Применение этой ловушки дает возможность получить в откачиваемом сосуде давление порядка $5 \cdot 10^{-7}$ Па и поддерживать его в течение длительного времени.

Форвакуумные адсорбционные ловушки. При работе механического насоса с масляным уплотнением в ваку-

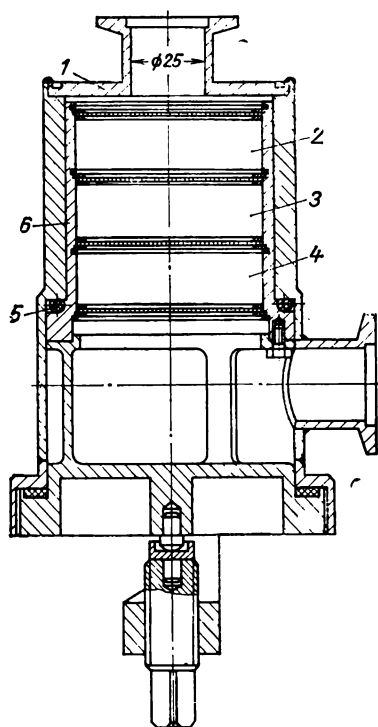


Рис. 9.9. Форвакуумная адсорбционная ловушка.

ют ограниченную емкость по отношению к парам масла, хорошо сорбируют различные углеродосодержащие соединения. Для предотвращения миграции масла по зазору между корпусом 1 и обоймой 6 установлен резиновый уплотнитель 5. Ловушка уменьшает быстроту действия механического насоса всего на 30% и обеспечивает надежную защиту откачиваемого сосуда от паров масла в течение 1000 ч.

умную систему поступает значительное количество масла и продуктов его крекинга вследствие его естественного испарения и миграции по внутренней поверхности трубопроводов, причем поступление масла из насоса резко возрастает с уменьшением давления в системе.

На рис. 9.9 показан чертеж форвакуумной адсорбционной ловушки. В корпус ловушки 1 вставлена обойма 6 с тремя пакетами 2, 3 и 4, которые заполнены различными адсорбентами. Пакет 4 содержит *активированный уголь*, имеющий наибольшую сорбционную емкость по парам масла, пакет 3 заполнен *активной окисью алюминия*, а пакет 2 — *силикагелем*. Последние два адсорбента, хотя и име-

Следует, однако, заметить, что при откачке через ловушку большой массы воздуха она быстро насыщается в основном парами воды и становится малоэффективной или даже препятствует достижению заданного разрежения. Поэтому целесообразно иметь дополнительный форвакуумный трубопровод, через который удаляется основная масса газа, и сосуд откачивается до давления 10^2 — 10 Па, минуя ловушку. При давлении 10^2 — 10 Па течение газа происходит в области вязкостного режима, при котором проникновение паров масла из насоса будет незначительным. Затем производится откачка сосуда до заданного давления через адсорбционную ловушку.

9.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ

При откачке сосудов механическими вакуумными насосами с масляным уплотнением наряду с адсорбционными ловушками применяют электрические (ионные) ловушки.

В электрической ловушке, схема которой представлена на рис. 9.10, используется электрический разряд.

В результате действия разряда происходит *полимеризация* проникших в ловушку углеводородов в твердые

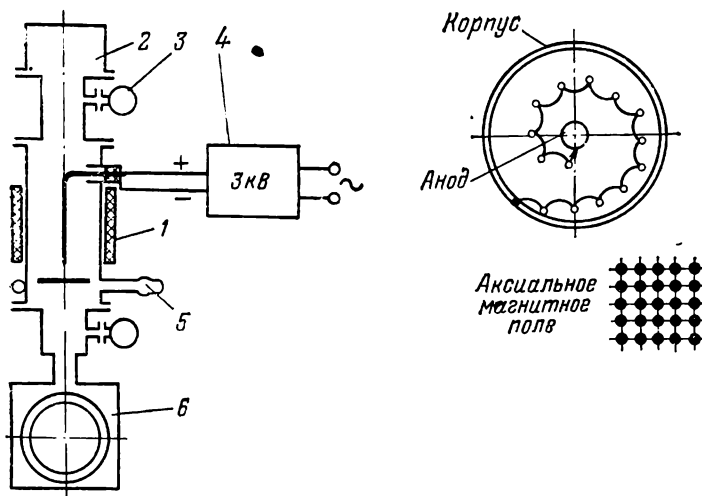


Рис. 9.10. Электрическая (ионная) ловушка.

1 — постоянный магнит; 2 — колпак; 3 — манометрический преобразователь; 4 — источник питания; 5 — штуцер водяного охлаждения; 6 — механический вакуумный насос: корпус — катод, центральный стержень — анод.

частицы, которые осаждаются на поверхности катода — корпусе ловушки. Основным условием протекания процесса полимеризации является адсорбция молекул углеводородов на поверхности катода. Поэтому необходима возможно полная ионизация углеводородов, с тем чтобы обеспечить их попадание на корпус ловушки.

В электрической ловушке эффективная ионизация достигается благодаря сложной траектории электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Напряженности электрического и магнитного полей выбираются таким образом, чтобы протяженность траектории электронов была бы наибольшей. При этом поток электронов направляется к аноду, а поток образовавшихся ионов — к катоду.

Во время соударения ионов с холодным катодом (корпусом ловушки) выбиваются новые электроны, которые поддерживают разряд и одновременно обеспечивают эффективное протекание процесса полимеризации.

Масс-спектрометрические исследования, проведенные на вакуумной системе с электрической ловушкой, показали, что парциальное давление паров рабочей жидкости снижается примерно в 100 раз, давление паров воды — в 4 раза, а кислород исчезает практически полностью. Применение ловушки этого типа целесообразно там, где достаточно иметь давление 1—0,1 Па с минимальным количеством углеводородов.

ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО И ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ ГАЗОВ

Глава десятая

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА (ВАКУУММЕТРЫ)

10.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВАКУУММЕТРОВ

Приборы для измерения давления газа ниже атмосферного называются *вакуумметрами*. Большинство вакуумметров состоит из двух элементов: *манометрического преобразователя* сигнала давления в электрический сигнал и *измерительного блока*. В литературе и промышленности употребляется также термин «манометр», применяемый к преобразователю давления.

Само понятие «давление газа» для вакуумной техники утратило свой смысл, так как почти нет таких процессов в вакуумной технике, которые определялись бы давлением газа как усилием на единицу поверхности. Гораздо более важными характеристиками газовой среды в вакуумной технике являются *плотность ρ* или *молекулярная концентрация N_1 газа*.

Молекулярная концентрация газа определяет теплоперенос, сорбционно-десорбционные процессы, воздействие газа на элементы электронных приборов и другие явления, наблюдаемые в вакууме.

Таблица 10.1

Соотношения между единицами давления и молекулярной концентрацией газа N_1 при 293 К

Единицы	Па (Н/м²)	мм рт. ст. (тор)		бар	$N_1, \text{м}^{-3}$
Па	1	$0,75 \cdot 10^{-2}$	$0,99 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$2,47 \cdot 10^{20}$
мм рт. ст. (тор)	133,32	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$3,29 \cdot 10^{22}$
ат	$1,01 \cdot 10^5$	760	1	1,01	$2,50 \cdot 10^{25}$
бар	$1,00 \cdot 10^5$	750	0,99	1	$2,47 \cdot 10^{25}$

Согласно уравнениям (1.1) и (1.16) между давлением p и молекулярной концентрацией N_1 существует связь

$$p/N_1 = kT. \quad (10.1)$$

Давление разреженного газа измеряется в паскалях. Соотношения между паскалями, другими единицами давления, употреблявшимися ранее, и молекулярной концентрацией N_1 приведены в табл. 10.1.

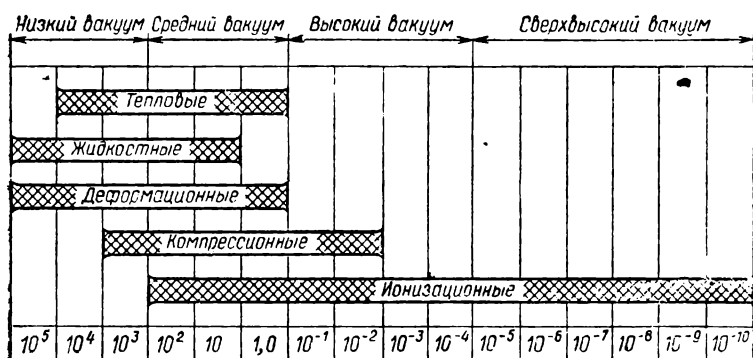


Рис. 10.1. Области давлений, измеряемые вакуумметрами.

По принципу действия вакуумметры можно свести в следующие классы:

жидкостные, непосредственно измеряющие давление (U-образные вакуумметры и их модификации);

компрессионные, действие которых основано на законе изотермического сжатия идеального газа (вакуумметр Мак-Леода);

деформационные, использующие в качестве чувствительного элемента сильфон, мембрану и т. п., в которых деформация чувствительного элемента служит мерой давления;

тепловые вакуумметры, использующие зависимость теплопроводности газа от давления; они подразделяются на термопарные и вакуумметры сопротивления;

ионизационные; в которых используется ионизация газа; большая группа приборов этого класса подразделяется в свою очередь на:

а) *электроразрядные*, принцип действия которых основан на зависимости параметров электрического разряда в разреженном газе от давления;

б) *электронные ионизационные*, ионизация газа в которых осуществляется потоком электронов, ускоряемых электрическим полем.

Области давлений, измеряемые вакуумметрами, показаны на рис. 10.1, а в табл. 10.2 приведены их основные характеристики.

Всю группу вакуумметров можно также разделить на приборы *прямого* и *косвенного* действия.

Вакуумметрами прямого действия являются приборы, которые непосредственно измеряют давление газа. Метрические свойства этих вакуумметров можно заранее рассчитать или получить с помощью градуировки по динаметрическим приборам. Отсчет давления вакуумметров прямого действия принципиально *не зависит от состава газа и его температуры*. Эти приборы перекрывают диапазон $1 \cdot 10^5$ — $1 \cdot 10^{-3}$ Па, причем их относительная погрешность тем меньше, чем выше давление.

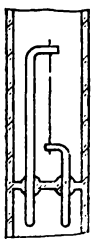
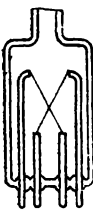
К вакуумметрам прямого действия относятся жидкостные, компрессионные и деформационные.

Вакуумметры косвенного действия измеряют не само давление, а некоторую его функцию и, как правило, состоят из манометрического преобразователя и измерительного блока. Отсчет давления (выходной сигнал) у вакуумметров косвенного действия *зависит от состава газа и его температуры*.

Вакуумметры косвенного действия способны измерять давления от атмосферного до 10^{-10} Па. К этим вакуумметрам относятся тепловые и ионизационные приборы.

Для удобства контроля давления в широком диапазоне ионизационные вакуумметры оснащаются обзорными шкалами с распределением отсчетов, близким к логарифмическому. При этом легко осуществляются запись давления и использование сигнала от вакуумметра для управления. Большинство промышленных вакуумметров имеет выход аналогового сигнала давления, изменяющегося от 0 до 10 В и рассчитанного на нагрузку не менее 2 кОм. Аналоговый сигнал может быть использован для ввода в ЭВМ, управления программными устройствами, блокировки и записи.

Некоторые типы вакуумметров (блокировочные), помимо измерения давления, способны сами производить управление каким-либо процессом по давлению. Блокировка чаще всего осуществляется по двум точкам, что

Тип вакуумметра	Принципиальное устройство	Диапазон измерений, Па	Применение
Жидкостные		10^{-10} — 10^5	Лабораторная практика, метрология
Компрессионные		10^{-3} — 10^3	Вакуумная метрология
Деформационные		1 — 10^5	Низковакуумное оборудование
Тепловые сопротивления		10^{-1} — 10^5	Технологические вакуумные установки
Тепловые парные		10^{-1} — 10^3	То же

Тип вакуумметра	Принципиальное устройство	Диапазон измерения	Применение
Электронные ионизационные		$10^{-8}—10^2$	Технологические вакуумные установки
Магнитные электроизрядные		$10^{-10}—10^{-2}$	Автоматизированные системы высокого и сверхвысокого вакуума

исключает возможность частого срабатывания по ложным сигналам. Выбранные значения давления срабатывания можно сближать в одну точку или разводить до крайних значений диапазона. Во всех блокировочных вакуумметрах разрывная мощность контактов реле не превышает 50 Вт для цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой 2 Гн и 500 Вт для цепей переменного тока (220 В, 50 Гц). При необходимости коммутирования цепей с большими токами блокировочные реле вакуумметров используются как промежуточные, управляющие внешними, более мощными реле.

В вакуумном приборостроении применяются нормализованные конструкции присоединительных элементов манометрических преобразователей. Все прогреваемые манометрические преобразователи монтируются на стандартном манометрическом фланце ДУ-50. Преобразователи на фланце ДУ-50 с металлическим уплотнителем выдерживают прогрев до 700 К.

В производственных условиях преимущественно используются деформационные вакуумметры и вакуумметры косвенного действия, которые практически безынерционны, охватывают широкий диапазон давлений и просты в эксплуатации.

10.2. ЖИДКОСТНЫЕ U-ОБРАЗНЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

Жидкостные U-образные вакуумметры служат для измерения абсолютного давления в диапазоне от атмосферного до 1 Па.

Жидкостные вакуумметры обычно представляют собой стеклянную трубку, изогнутую в виде латинской буквы *U* и частично заполненную рабочей жидкостью. Принцип работы жидкостных вакуумметров основан на изменении уровней рабочей жидкости в обоих коленах трубки в зависимости от разности давлений над этими уровнями.

Одним концом вакуумметр присоединяется к вакуумной системе, давление в которой требуется измерить, другой конец или открыт (т. е. постоянно сообщается с атмосферой) или закрыт (запаян).

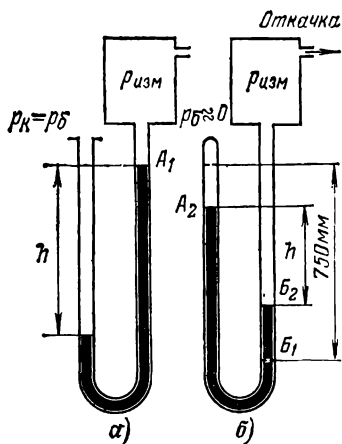


Рис. 10.2. Жидкостные U-образные вакуумметры.

а — открытый вакуумметр; *б* — закрытый вакуумметр.

Открытые U-образные вакуумметры. Поскольку до начала откачки над уровнями в обоих коленах давление одинаково (равно атмосферному), оба уровня находятся на одинаковой высоте.

Если начать откачку вакуумной системы, то уровни рабочей жидкости начнут перемещаться (рис. 10.2). Перепад давлений $p_b - p_{изм}$, действующих на поверхности жидкости, уравнивается гидростатическим давлением разности высот столба жидкости в коленях вакуумметра. Давление столба жидкости определяется его массой, отнесенной к единице площади, и зависит только от высоты столба h и плотности жидкости ρ :

$$\Delta p = p_b - p_{изм} = g\rho h, \quad (10.2)$$

где p_b — атмосферное (барометрическое) давление;

$p_{изм}$ — измеренное давление;

ρ — плотность жидкости в вакуумметре;

h — разность уровней жидкости;

g — ускорение силы тяжести.

Таким образом, мы видим, что показания вакуумметра зависят от атмосферного давления. При известном атмосферном давлении p_6 в момент измерения можно подсчитать абсолютное давление в вакуумной системе:

$$p_{\text{изм}} = p_6 - \rho g h.$$

Если в качестве рабочей жидкости вакуумметра взять ртуть, то

$$p_{\text{изм}} = p_6 - 1,33 \cdot 10^2 h, \text{ Па},$$

где p_6 — в паскалях;

h — в миллиметрах.

Таким образом, для того, чтобы измерить давление в вакуумной системе открытым ртутным вакуумметром, необходимо знать атмосферное (барометрическое) давление p_6 в момент измерения и из него вычесть $1,33 \times 10^3 h$.

Закрытые U-образные вакуумметры. Закрытые U-образные вакуумметры измеряют разность давлений в вакуумной системе $p_{\text{изм}}$ и в запаянном колене вакуумметра p_k . В закрытых вакуумметрах в качестве рабочей жидкости применяют ртуть, которую заливают в вакуумметр, предварительно откачанный до давления не больше 0,1 Па. Поэтому давление p_k в запаянном колене можно полагать равным нулю независимо от высоты уровня («торричеллиева пустота»).

До начала откачки, пока давление в вакуумной системе равно атмосферному $p_{\text{изм}} = p_6$, например 10^5 Па, ртуть занимает положение A_1 в закрытом колене и B_1 со стороны вакуумной системы (рис. 10.2,б). Очевидно, разность уровней A_1-B_1 должна по вертикальному направлению составлять как раз 750 мм, так как только таким образом уравнивается различие в давлениях со стороны обеих уровней ртути.

По мере откачки давление в вакуумной системе будет уменьшаться, и для уравнивания разницы давлений над уровнями ртути понадобится уже меньшая разность уровней, например A_2-B_2 . Наконец, когда достигнуто достаточно низкое давление, уровни ртути в обоих коленях будут находиться на одинаковой высоте, так как со стороны вакуумной системы достигнуто давление, практически равное давлению над уровнем ртути в закрытом колене.

Таким образом, при помощи закрытого U-образного вакуумметра давление $p_{\text{изм}}$ в вакуумной системе изме-

ряется путем непосредственного отсчета разности уровней ртути:

$$p_{\text{изм}} = 1,33 \cdot 10^2 h, \text{ Па},$$

где $h = A - B$, мм.

10.3. КОМПРЕССИОННЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

Общее описание и принцип работы

Для измерения давления ниже 1 Па обычные жидкостные вакуумметры малопригодны из-за невысокой точности и громоздкости. Для измерения абсолютных давлений ниже 1 Па до 10^{-3} Па нашли применение компрессионные вакуумметры с предварительным сжатием газа.

Компрессионный вакуумметр был сконструирован Мак-Леодом в 1874 г. и часто называется его именем.

Вакуумметр (рис. 10.3) состоит из стеклянного баллона 1 сферической формы с измерительным капилляром 2, верхний конец которого запаян. От баллона 1 вниз идет припаянная к нему трубка 3, имеющая вверху ответвление 4, сообщающее измерительную часть вакуумметра через трубку 8 с вакуумной системой. В свою

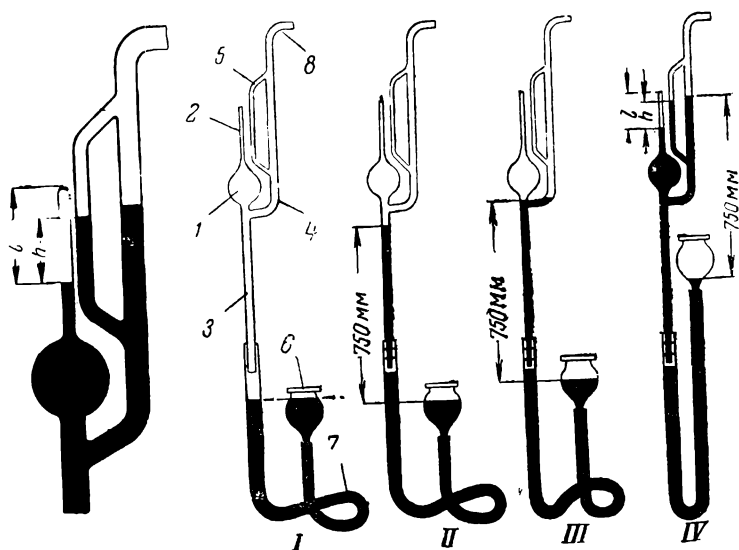


Рис. 10.3. Компрессионный вакуумметр Мак-Леода.

очередь трубка 4 разветвляется, образуя сравнительный капилляр 5.

Измерительный и сравнительный капилляры имеют одинаковые внутренние диаметры, с тем чтобы исключить ошибку измерения. К нижнему концу трубки 3 через резиновый шланг 7 присоединяется груша 6 с ртутью. Груша сверху открыта, и, следовательно, над уровнем ртути в груше давление всегда равно атмосферному.

Перед измерением, когда в вакуумной системе атмосферное давление, уровни ртути в груше и в резиновом шланге будут одинаковы (рис. 10.3, I).

При откачке вакуумной системы уровень ртути в резиновом шланге и далее в трубке 3 будет подниматься, а в груше несколько понизится. Когда разность уровней достигнет соответствия атмосферному давлению (например, 750 мм), дальнейшее перемещение ртути прекратится, и вакуумметр готов к измерению давления (рис. 10.3, II). Положение груши и измерительной части должно быть заранее предусмотрено с таким расчетом, чтобы до измерения поднимающаяся ртуть не могла дойти до ответвления 4. Это необходимо для того, чтобы сообщение между измерительной частью и вакуумной системой не было перекрыто ртутью и, следовательно, чтобы до измерения в измерительной части и в вакуумной системе было одно и то же давление.

Для измерения давления поднимают грушу 6. При этом поднимается уровень ртути в трубке 3, и в некоторый момент (рис. 10.3, III) ртуть перекроет сообщение измерительной части вакуумметра с вакуумной системой. Начиная с этого положения в измерительной части остается определенное количество газа pV_1 , занимающее в момент перекрытия объем V_1 , складывающийся из объемов: измерительного капилляра, сферического баллона I и небольшого участка трубки между баллоном и ответвлением; давление же в перекрытой части, очевидно, совпадает с измеряемым давлением $p_{изм}$ в вакуумной системе.

При дальнейшем поднимании груши как давление, так и объем газа в измерительной части изменяются: давление становится больше, а объем газа во столько же раз меньше.

Положим, мы прекратим поднимание груши в момент, когда ртуть в измерительном капилляре заняла

какой-то уровень (рис. 10.3, IV). Уровень в сравнительном капилляре 5 будет выше уровня ртути в измерительном капилляре 2 на отрезок h , так как над уровнем ртути в сравнительном капилляре давление будет меньше и равно измеряемому $p_{\text{изм}}$.

Очевидно, что давление (мм рт. ст.) сжатой в измерительном капилляре порции газа будет измеряться суммой $h + p_{\text{изм}}$, а количество газа будет равно $(h + p_{\text{изм}}) V_2$. Так как количество газа, перекрытого в момент, соответствующий рис. 10.3, III, осталось неизменным, температура практически также не изменялась, то можно, применив закон Бойля — Мариотта, записать:

$$p_{\text{изм}} V_1 = (h + p_{\text{изм}}) V_2 = p_1 V_2.$$

Обычно компрессионные вакуумметры используют для измерений таких низких давлений, которые заметного влияния на разность уровней h не оказывают, т. е. когда $p_{\text{изм}} \ll h$; поэтому можно записать:

$$p_{\text{изм}} = 1,33 \cdot 10^2 \frac{V_2}{V_1} h, \text{ Па}, \quad (10.3)$$

где h в миллиметрах.

Таким образом, измерение давления в вакуумной системе компрессионным вакуумметром сводится к такому уменьшению первоначального объема газа V_1 до объема V_2 , чтобы первоначальное, очень малое давление $p_{\text{изм}}$, которое нужно измерить, было увеличено до давления, измеряемого непосредственно по разности уровней ртути h в измерительном и сравнительном капиллярах.

Способы градуировки и измерения

В зависимости от способа градуировки существуют два метода измерения давления компрессионным вакуумметром: метод *линейной* шкалы и метод *квадратичной* шкалы.

По методу *линейной шкалы* (рис. 10.4, б) газ сжимается до заранее известного объема, отмеченного делением на высоте l капилляра 1. Давление газа p_1 , в мм рт. ст. в измерительном капилляре, очевидно, равно высоте ртутного столба h в сравнительном капилляре 2, отсчитываемой от отмеченного деления. Давление газа $p_{\text{изм}}$ в вакуумной системе можно определить по

формуле (10.3):

$$p_{\text{изм}} = 1,33 \cdot 10^3 \frac{V_2}{V_1} h = K_{\text{в}} h,$$

где $p_{\text{изм}}$ — давление в вакуумной системе, Па;

h — высота ртутного столба в сравнительном капилляре, мм;

V_1 — объем сферического баллона с измерительным капилляром;

V_2 — объем части измерительного капилляра, не заполненный ртутью;

$K_{\text{в}}$ — постоянная вакуумметра.

Так как значение $K_{\text{в}}$ для данной метки постоянно, то измеряемое давление $p_{\text{изм}}$ прямо пропорционально разности уровней h ; отсюда и название метода линейной шкалы.

Таким образом, калибровка компрессионного вакуумметра, т. е. определение его метрических характеристик, сводится к измерению оставшегося свободным объема

измерительного капилляра V_2 и полного объема V_1 сферического баллона и измерительного капилляра. Не-

трудно видеть, что $K_{\text{в}} = 1,33 \cdot 10^3 \frac{V_2}{V_1} = 1,33 \cdot 10^3 \frac{\pi d^2 l}{4 V_1}$,

следовательно, чтобы вакуумметр сделать более чувствительным к низким давлениям, надо брать баллон (V_1) по возможности большего объема, а капилляр брать по возможности меньшего диаметра d . Наоборот, чтобы компрессионный вакуумметр позволял измерять более высокие давления, берут малый баллон и широкий капилляр.

Обычно, для того, чтобы исключить возможность разрыва столба ртути, диаметр капилляра делают не менее

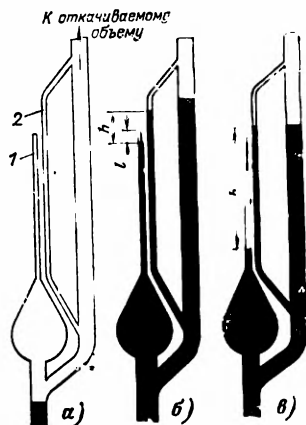


Рис. 10.4. Измерительная головка ртутного компрессионного вакуумметра

а — перед измерением; б — измерение по методу линейной шкалы; в — измерение по методу квадратичной шкалы.

1 мм. Объем сферического баллона может достигать 0,7 л.

По методу квадратичной шкалы (рис. 10.4,в), который применяется для измерения давлений в более широком диапазоне, ртуть доводят в сравнительном капилляре 2 до уровня, соответствующего верхушке измерительного капилляра 1. В этом случае давление в вакуумной системе равно:

$$p_{\text{изм}} = 1,33 \cdot 10^2 \cdot \frac{V_2}{V_1} h = 1,33 \cdot 10^2 \cdot \frac{\pi d^2 h}{4V_1} h, \text{ Па},$$

где d — внутренний диаметр измерительного капилляра, мм;

V_1 — объем баллона с измерительным капилляром, мм³;

h — высота ртути, мм.

Величина $1,33 \cdot 10^2 \pi d^2 / 4V_1$, как зависящая только от размеров вакуумметра, является для данного экземпляра вакуумметра постоянной. Обозначив ее через K_v , получим:

$$p_{\text{изм}} = K_v h^2.$$

Так как значение K_v является постоянной величиной, то измеряемое давление $p_{\text{изм}}$ прямо пропорционально квадрату разности уровней в измерительном и сравнительном капиллярах; отсюда и название метода квадратичной шкалы.

Особенности компрессионного вакуумметра

Работа жидкостного и компрессионного вакуумметра с ртутным наполнением связана с несколькими особенностями, которые следует учитывать, чтобы не делать ошибок при измерении давления.

1. В откачиваемый сосуд при измерении давления проникают пары ртути, которые загрязняют его и повышают давление в нем.

2. Компрессионными вакуумметрами проводят разовое измерение давления. Отсчет давления трудно передавать в автоматические системы записи и управления.

3. Компрессионный вакуумметр, как и U-образный жидкостный, является абсолютным вакуумметром, т. е. его можно рассчитать и проградуировать без сравнения с показаниями какого-либо другого вакуумметра.

10.4. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

Деформационные вакуумметры измеряют давление от атмосферного до 0,1 Па. Мерой давления в них служит деформация чувствительного элемента, происходящая под действием приложенной к нему разности давлений.

Одним из основных достоинств деформационных вакуумметров является независимость их показаний от рода газа. В лабораторной практике и в промышленности для измерения абсолютных давлений нашли применение деформационные вакуумметры трех основных типов: *трубчатые, мембранные и сильфонные.*

Трубчатые вакуумметры. В качестве элемента, чувствительного к разности давлений, трубчатый вакуумметр имеет трубку 1 эллиптического сечения, свернутую в спираль (рис. 10.5). Один конец этой трубки подсоединен к вакуумной системе при помощи штуцера 4, а другой — запаян и соединен через систему рычагов с зубчатым

сектором 3, который приводит во вращение стрелку 2. Наружная поверхность трубки 1 всегда подвержена действию атмосферного давления. Пока в трубке сохраняется атмосферное давление (разность давлений равна нулю), стрелка стоит на нуле шкалы, так как отсутствует деформация трубки.

Изменение давления в вакуумном сосуде, к которому подсоединен вакуумметр, вызывает деформацию трубки под действием разности давлений вне и внутри нее и, следовательно, поворот стрелки. Угол поворота стрелки пропорционален измеряемой разности давлений. Деления шкалы h , против которого останавливается стрелка, показывает, очевидно, разность между атмосферным

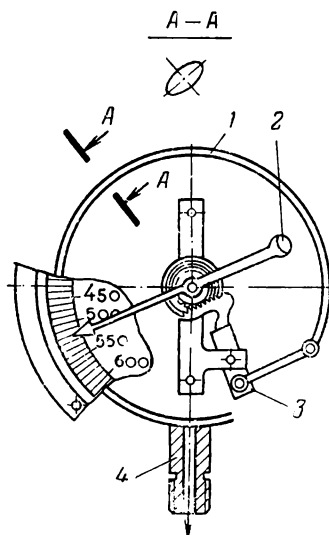


Рис. 10.5. Трубчатый вакуумметр.

1 — трубка эллиптического сечения; 2 — стрелка; 3 — зубчатый сектор; 4 — штуцер.

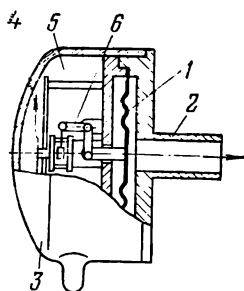


Рис. 10.6. Мембранный стрелочный вакуумметр.

1 — мембрана; 2 — штуцер; 3 — корпус; 4 — стрелка; 5 — пространство, откачиваемое до давления 0,1 Па; 6 — рычаг.

(барометрическим) давлением $p_б$ и давлением $p_{изм}$ внутри трубки. Давление в вакуумном сосуде $p_{изм}$ будет равно:

$$p_{изм} = p_б - h. \quad (10.4)$$

Таким образом, показания вакуумметра зависят от барометрического давления.

Мембранные вакуумметры. В мембранных вакуумметрах (рис. 10.6) также используется деформация чувствительного элемента.

В вакуумметре мембрана 1 вакуумно-плотно отделяет пространство 5, ограниченное корпусом 3 и откачанное до давления $p < 0,1$ Па (сравнительное давление), от откачиваемого сосуда, к которому вакуумметр подсоединен штуцером 2. Сравнительное давление для описываемого вакуумметра можно считать равным нулю; поэтому разность давлений с обеих сторон мембраны непосредственно измеряется давление в вакуумном сосуде.

Таким образом, показания мембранного вакуумметра в отличие от трубчатого не зависят от барометрического давления.

Сильфонные вакуумметры по существу ничем не отличаются от мембранных, но в них увеличен ход чувствительного элемента путем применения вместо мембраны гибкой гофрированной трубки — сильфона. При тех же габаритах сильфоны имеют значительно меньшую жесткость, чем мембраны, и, следовательно, обеспечивают большую чувствительность измерений.

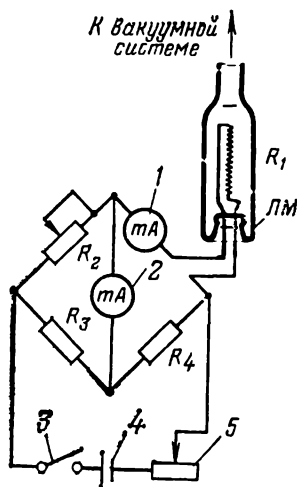
10.5. ТЕПЛОВЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

Тепловые вакуумметры нашли широкое применение для измерения давлений от 10^5 до 0,1 Па.

Принцип действия тепловых вакуумметров основан на зависимости теплопроводности газа от давления. При низких давлениях, когда средняя длина свободного пути молекул больше среднего расстояния между нагретым телом и стенками манометрического преобразо-

Рис. 10.7. Манометрический преобразователь сопротивления и упрощенная схема измерительного блока.

ЛМ — лампа манометрическая (преобразователь); R_1 — сопротивление нити накала; R_2 — переменный резистор; R_3 и R_4 — постоянные резисторы; 1 и 2 — миллиамперметры; 3 — выключатель; 4 — батарея; 5 — реостат.



вателя, теплопроводность газа пропорциональна давлению. При более высоких давлениях, когда средняя длина свободного пути молекул значительно меньше среднего расстояния между нагретым телом и стенками преобразователя, теплопроводность газа не зависит от давления. В области промежуточных давлений передача тепла увеличивается с ростом давления до постоянного значения (см. гл. 1).

Манометрические преобразователи тепловых вакуумметров по принципиальному устройству делятся на две большие группы: *сопротивления* и *термопарные*.

Простейшая конструкция манометрического преобразователя сопротивления представляет собой стеклянную или металлическую трубку, по оси которой натянута нить, нагреваемая пропусканием тока (рис. 10.7). Подводимая к нити накала электрическая энергия расходуется на нагрев газа, излучение и отвод тепла через электрические вводы. При низких давлениях баланс энергии может быть выражен уравнением

$$I^2 R_n (1 + \alpha_n \Delta T) = c_n p \Delta T + \sigma_n (T^4 - T_0^4) + b_n \Delta T, \quad (10.5)$$

где $c_n p \Delta T$ — мощность, отводимая через газ, окружающий нить, к стенкам трубки;

p — давление газа в преобразователе;

$$\Delta T = T - T_0;$$

T — температура нити;

T_0 — температура окружающей среды;

$\sigma_n (T^4 - T_0^4)$ — мощность, рассеиваемая нитью, вследствие излучения (по закону Стефана — Больцмана);

$b_n \Delta T$ — мощность, отводимая через подвеску нити и электрические вводы путем теплопроводности;

I — ток нити накала;

R_n — сопротивление нити накала при температуре T_0 ;

α_n — температурный коэффициент сопротивления материала нити;

c_n, σ_n, b_n — коэффициенты пропорциональности.

Давление p можно найти из уравнения (10.5):

$$p = \frac{I^2 R_n (1 + \alpha_n \Delta T) - b_n \Delta T - \sigma_n (T^4 - T_0^4)}{c_n \Delta T}. \quad (10.6)$$

Это уравнение описывает градуировочную кривую преобразователя, причем об изменении давления можно судить как по изменению тока накала I нити при постоянстве температур T и T_0 , так и по изменению температуры нити T при постоянном токе накала I .

Вакуумметры сопротивления (режим постоянства температуры)

На рис. 10.7 схематически изображены один из вариантов манометрического преобразователя сопротивления и упрощенная схема измерительного блока.

Манометрический преобразователь представляет собой стальную трубку, внутри которой на двух вводах натянута вольфрамовая нить накала.

Измерительная часть вакуумметра содержит мост для измерения сопротивлений:

R_1 — сопротивление нити манометрического преобразователя, обладающее большим температурным коэффициентом, чтобы изменение температуры нити достаточно резко сказывалось на сопротивлении R_1 ;

R_2 — переменное сопротивление из материала с малым температурным коэффициентом, чтобы изменение температуры практически не сказывалось на нем;

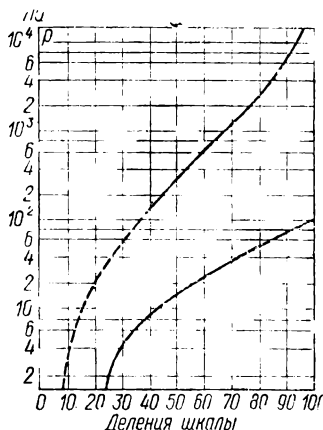
R_3 и R_4 — постоянные сопротивления также с очень малым температурным коэффициентом, причем $R_3 = R_4$. Обычно сопротивления R_3 и R_4 изготавливают из манганина или константана.

Рис. 10.8. Градуировочные кривые манометрического преобразователя сопротивления по воздуху.

Верхняя сплошная кривая соответствует диапазону давлений $4 \cdot 10^3$ —92 Па, нижняя сплошная кривая соответствует диапазону давлений 92—1 Па.

Измерение давления обычно проводят при постоянной температуре нити манометрического преобразователя. При изменении давления начинают меняться теплоотвод и, следовательно, температура нити. Уменьшением тока накала I температуру нити возвращают к исходному значению и судят о давлении по значению тока I , который измеряют прибором 1.

Чтобы по положению стрелки на шкале прибора 1 измерить давление, вакуумметр заранее градуируется. На рис. 10.8 показаны градуировочные кривые одного из вакуумметров, из которых видно, что верхний предел измеряемых давлений, начиная с которого стрелка прибора начнет заметно перемещаться, находится в области тысяч паскаль, а нижний предел достигает 1 Па.



Термопарные вакуумметры (режим постоянства тока накала)

На рис. 10.9 схематически изображены конструкция термопарного манометрического преобразователя и упрощенная схема измерительного блока. Манометрический преобразователь ЛМ представляет собой стеклянный или металлический корпус, в котором на двух вводах смонтирован платиновый или никелевый подогреватель 3, на двух других вводах крепится термопара 4, изготовленная из хромель — копелья или хромель — алюминия.

Термопара и подогреватель сварены через перемычку П. Подогреватель нагревается током, который можно регулировать реостатом 5 и измерять миллиамперметром 1. Спай термопары, нагреваемый подогревателем, является источником термо-э. д. с., значение которой показывает милливольтметр 2.

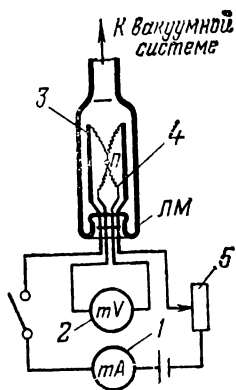


Рис. 10.9. Термопарный манометрический преобразователь и упрощенная схема измерительного блока.

ЛМ — лампа манометрическая (преобразователь); 1 — миллиамперметр; 2 — милливольтметр; 3 — подогреватель; 4 — термопара; 5 — реостат; П — общая точка подогревателя и термопары.

Пока давление в вакуумной системе равно атмосферному, стрелка милливольтметра при заданном для данной манометрической лампы токе накала I стоит вблизи нуля. При понижении давления в системе стрелка начинает перемещаться в сторону увеличения термо-Э. д. с., так как с уменьшением давления уменьшается теплопроводность газа и, следовательно, повышается температура перемычки. Точность измерения давления термопарным вакуумметром существенно зависит от правильного подбора тока накала подогревателя. Ток накала подогревателя можно определить до вскрытия новой лампы (в случае стеклянного корпуса) или при откачке преобразователя до давления $p < 1,3 \cdot 10^{-2}$ Па.

При этих давлениях теплоотвод по газу от подогревателя пренебрежимо мал и вся подводимая мощность расходуется на излучение (около 63%) и теплоотвод по вводам (около 37%). Ток подогревателя подбирают таким образом, чтобы стрелка милливольтметра точно совпадала с последним делением шкалы; при этом показания миллиамперметра (шкала «ток накала») будут соответствовать рабочему току подогревателя.

Градуировочные кривые одного из промышленных термопарных преобразователей по воздуху показаны на рис. 10.10.

Особенности тепловых вакуумметров

Достоинствами тепловых вакуумметров являются возможность непрерывного наблюдения за изменением давления в вакуумной системе, простота конструкции и их применимость к измерению давлений всех газов и паров. Как уже упоминалось, тепловые вакуумметры являются приборами косвенного действия, и их градуировочные кривые для различных газов различны и определяются теплопроводностью этих газов и коэффици-

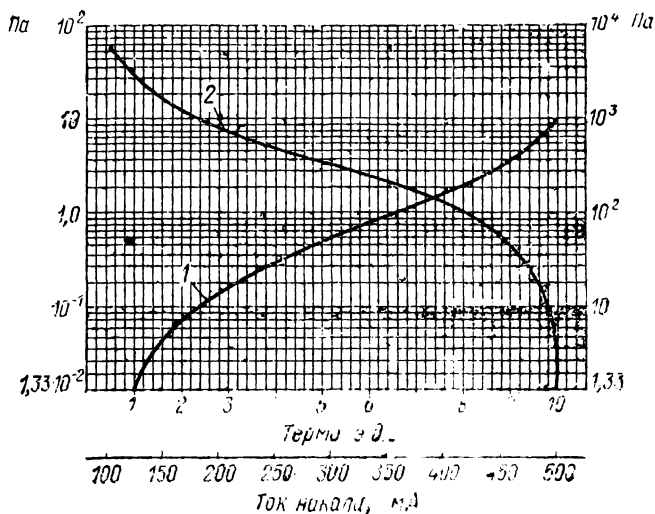


Рис. 10.10. Градуировочные кривые для термопарного манометрического преобразователя по воздуху.

1 — градуировочная кривая для измерения давления в диапазоне $6,6 \cdot 10^2$ — 66 Па; 2 — градуировочная кривая для измерения давления в диапазоне 66 — $1 \cdot 10^{-1}$ Па.

циентом температурной аккомодации молекул газа на нагревателе.

Тепловые вакуумметры не боятся прорывов атмосферы и имеют практически неограниченный срок службы. Загрязненные парами масла преобразователи очищаются промывкой в органическом растворителе. При наличии в газовой среде повышенной концентрации паров масел или воды между преобразователем и обследуемой системой необходимо устанавливать низкотемпературную охлаждаемую ловушку.

Существенным недостатком тепловых вакуумметров является изменение тока накала нити с течением времени, что требует проведения периодической проверки тока накала. Некоторым недостатком тепловых вакуумметров является их относительная инерционность — задержка отсчета во времени при быстром изменении давления.

10.6. ЭЛЕКТРОННЫЕ ИОНИЗАЦИОННЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

Принцип действия

Работа ионизационных манометрических преобразователей основана на ионизации газа электронным пото-

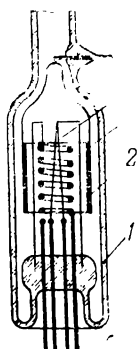


Рис. 10.11. Конструкция электронного ионизационного манометрического преобразователя.

1 — стеклянный баллон; 2 — коллектор ионов; 3 — анодная сетка; 4 — катод.

ком и измерении ионного тока, по которому судят о давлении.

Конструкция наиболее распространенного отечественного электронного ионизационного манометрического преобразователя показана на рис. 10.11. В стеклянном баллоне преобразователя 1 смонтирована трехэлектродная система, состоящая из коллектора ионов 2, анодной сетки 3 и прямоканального катода 4. На анодную сетку относительно катода подается напряжение $+200$ В, а на цилиндрический коллектор ионов -50 В. Анодная сетка преобразователя выполнена из вольфрамовой проволоки диаметром $0,2$ мм в виде бифилярной спирали. При прогреве преобразователя для его обезгаживания по спирали пропускается ток 3 А.

Вольфрамовый катод преобразователя испускает электроны, которые движутся к аноду. Часть электронов пролетает сквозь анодную сетку и попадает в пространство, заключенное между анодной сеткой и коллектором. Так как коллектор имеет отрицательный потенциал относительно катода, электроны не могут попасть на коллектор. В точке пространства с нулевым потенциалом электроны останавливаются и начинают движение в противоположном направлении — к положительно заряженной анодной сетке. В результате у сетки непрерывно колеблются электроны, причем прежде, чем попасть на анод, электроны совершают в среднем до 5 колебаний. При столкновении электронов с молекулами газа происходит ионизация молекул. Образовавшиеся положительные ионы собираются на находящемся под отрицательным потенциалом коллекторе, создавая в его цепи ионный ток.

Как показал опыт, при достаточно низких давлениях (обычно ниже $0,1$ Па) отношение ионного тока I_n к электронному току I_e прямо пропорционально давлению газов $p_{изм}$ в манометрическом преобразователе:

$$\frac{I_n}{I_e} = S_m p_{изм}. \quad (10.7)$$

Это соотношение и лежит в основе работы электронного ионизационного преобразователя.

Множитель пропорциональности

$$S_M = \frac{I_n}{I_e} \frac{1}{p_{изм}}$$

выражает *чувствительность* преобразователя: очевидно, чувствительность тем выше, чем больше отношение I_n/I_e при данном давлении $p_{изм}$.

Для получения однозначной зависимости ионного тока от давления электронный ток манометрического преобразователя поддерживают постоянным.

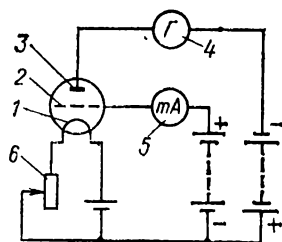
Тогда

$$I_n = k_T p_{изм}, \quad (10.8)$$

где $k_T = S_M I_e$ характеризует величину ионного тока на единицу давления (k_T иногда называют *токовой чувствительностью* или *постоянной электронного ионизационного преобразователя*).

Рис. 10.12. Упрощенная принципиальная схема включения электронного ионизационного манометрического преобразователя.

1 — катод; 2 — анодная сетка; 3 — коллектор ионов; 4 — прибор для измерения ионного тока; 5 — миллиамперметр; 6 — реостат.



При работе с различными газами чувствительность преобразователя будет отличаться от чувствительности по воздуху, но линейная зависимость сохраняется. В приложении приведены значения отношений чувствительности электронного ионизационного преобразователя по некоторым газам к чувствительности его по воздуху.

На основании (10.8) давление в манометрическом преобразователе определяется соотношением

$$p_{изм} = \frac{1}{k_T} I_n. \quad (10.9)$$

Таким образом, для измерения давления достаточно при заданном электронном токе измерить ионный ток и разделить на постоянную преобразователя.

На рис. 10.12 приведена упрощенная принципиальная схема включения электронного ионизационного преобразователя.

В электрическую схему измерительного блока входят:

а) цепь катода 1, состоящая из источника питания и реостата 6 для регулировки температуры и, следовательно, эмиссии электронов;

б) цепь сетки 2, состоящая из источника питания и прибора 5 для измерения электронного тока;

в) цепь коллектора 3, состоящая из источника питания и прибора 4 для измерения ионного тока.

Электронные ионизационные преобразователи для измерения давления в диапазоне среднего вакуума

Верхний предел давлений, измеряемых электронными ионизационными манометрическими преобразователями, ограничен следующими основными причинами:

1) малым сроком службы обычного вольфрамового термокатода, который в присутствии химически активных газов выходит из строя;

2) нелинейностью зависимости ионного тока в цепи коллектора от давления газа.

Верхний теоретический предел измеряемых давлений

$$p_{\text{изм. макс}} = 1/s_m. \quad (10.10)$$

Таким образом, электронный ионизационный преобразователь для измерения высоких давлений должен иметь высокостойкий против химического воздействия газов катод и малую чувствительность s_m .

Электронные ионизационные манометрические преобразователи для измерения сверхвысокого вакуума

Нижний предел давлений, измеряемых электронными ионизационными манометрическими преобразователями, определяется фоновым током, не зависящим от давления. Это прежде всего фоновый ток фотоэлектронной эмиссии с коллектора и ток ионно-электронной десорбции с анода. Фоновый ток фотоэлектронной эмиссии образуется при облучении коллектора ионов мягким рентгеновским излучением с анода, возникающим при бомбардировке его электронным потоком. Фоновый ток фотоэлектронной эмиссии

$$I_{\text{ф.э}} = k_{\text{ф.э}} I_e Z_a U_{\text{а.кф}}, \quad (10.11)$$

где $k_{\text{ф.э}}$ — коэффициент пропорциональности;
 I_c — электронный ток на аноде;
 Z_a — атомный номер материала анода;
 $n = 1,4 \div 2$ — показатель степени;
 $U_{a.k}$ — напряжение на аноде относительно катода;
 φ — телесный угол, под которым коллектор про-
 сматривается с анода.

Так, фоновый ток фотоэлектронной эмиссии одного из преобразователей имеет значение, соответствующее давлению $5 \cdot 10^{-7}$ Па, т. е. давление $5 \cdot 10^{-6}$ Па преобразователь измеряет с дополнительной погрешностью в 10%. Поэтому считают, что нижний предел измеряемых давлений $p_{\text{изм. мин}}$ определяется условием $I_p = I_{\text{ф.э}}$ и в соответствии с уравнениями (10.7) и (10.11)

$$p_{\text{изм. мин}} = \frac{R_{\text{ф.э}}}{s_m}, \quad (10.12)$$

где s_m — чувствительность;
 $R_{\text{ф.э}}$ — фоновая постоянная:

$$R_{\text{ф.э}} = k_{\text{ф.э}} Z_a U_{a.k}^n \varphi. \quad (10.13)$$

Для снижения фоновой постоянной уменьшают прежде всего телесный угол φ , при этом коллектор преобразователей сверхвысоковакуумного диапазона выполняется в виде тонкой нити или стержня.

Возможен еще один источник значительной ошибки при измерении низких давлений. Электронный поток на анод наряду с десорбцией газа с его поверхности производит частичную ионизацию газа. Вместе с ионами из газовой фазы ионы десорбирующего газа также поступают на коллектор и искажают отсчет давления.

При давлениях выше 10^{-5} Па эффектами ионно-электронной десорбции можно пренебречь. При более низких давлениях для снижения токов ионной десорбции необходим тщательный и длительный прогрев анодной сетки преобразователя.

Для измерения давления до 10^{-8} Па промышленностью выпускается серия электронных ионизационных манометрических преобразователей с осевым коллектором ионов.

Коллектор ионов преобразователя (рис. 10.13) установлен по оси анодной сетки 2 и выполнен в виде тонкого вольфрамового стержня, имеющего в основании диаметр 0,1 мм и постепенно утончающегося к вершине.

Преобразователь имеет сменный катод 1, расположенный с наружной стороны анодной сетки 2. При работе преобразователя электроны колеблются по обе стороны анодной сетки. На коллектор 3 попадают только те ионы, которые образовались внутри нее. Анодная сетка 2 преобразователя может быть обезгажена электронной бомбардировкой или пропусканием тока по ней. В последнем случае сетка может быть нагрета до 1100 К.

Электроды преобразователя размещаются на фланце 5 непосредственно в вакуумном сосуде, в котором измеряют давление. Для исключения влияния окружа-

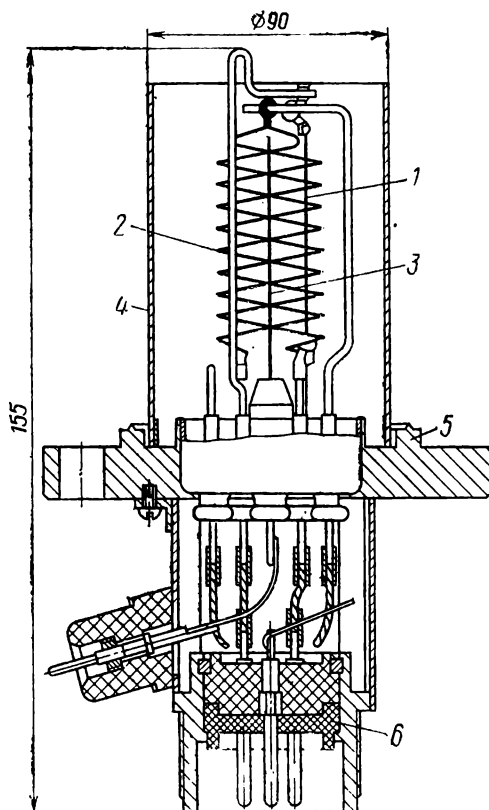


Рис. 10.13. Электронный ионизационный преобразователь для измерения сверхнизких давлений.

1 — катод; 2 — анодная сетка; 3 — коллектор; 4 — экран; 5 — фланец; 6 — цоколь.

ющих преобразователь металлических конструкций вакуумной системы на метрические характеристики преобразователя и воздействия различного рода наводок. Электродная система окружена заземленным металлическим экраном 4. При давлениях выше 10^{-3} Па экран отключается от общего минуса и используется в качестве анода. Коллектором ионов служит в этом случае анодная сетка преобразователя.

10.7. МАГНИТНЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

Принцип действия

Магнитные электроразрядные вакуумметры способны измерять как достаточно высокие давления около 10^2 Па, так и сверхнизкие давления, вплоть до 10^{-10} Па и ниже.

Ионизация газа в этих вакуумметрах осуществляется не термоэлектронами, эмиттируемыми нагретым катодом, а обеспечивается и поддерживается благодаря самостоятельному разряду между холодными электродами. Принцип работы магнитного электроразрядного вакуумметра можно понять из упрощенной схемы, изображенной на рис. 10.14.

В манометрическом преобразователе имеются всего два электрода: катод, которым является металлический корпус 1 прибора, и анод в виде металлического кольца 2. Вдоль оси анода создается магнитное поле с индукцией 0,05—0,2 Тл, создаваемое постоянным магнитом 4.

Через балластное, ограничивающее сопротивление 3 на анод подается высокое положительное напряжение (2,5—3 кВ). При достаточно низком давлении между анодом и корпусом прибора возникает самостоятельный

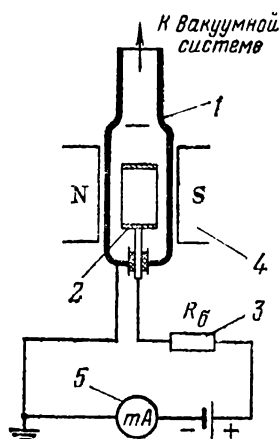


Рис. 10.14. Манометрический преобразователь магнитного электроразрядного вакуумметра и упрощенная схема измерительного блока.

1 — корпус (катод); 2 — кольцевой анод;
3 — балластный резистор; 4 — постоянный магнит; 5 — измерительный прибор.

тлеющий разряд. Для возникновения разряда необходимо, чтобы вблизи катода (корпуса) появился хотя бы один электрон, который под совместным действием электрического и магнитного полей будет двигаться к положительно заряженному аноду по удлиненной траектории. При этом повышается вероятность соударения электрона с молекулами газа и их ионизации. Такие одиночные электроны всегда появляются, например, под действием космического излучения. Эти электроны и дают начало ионизации молекул газа.

Образовавшиеся при ионизации положительные ионы перемещаются к корпусу (катоде) и нейтрализуются на нем. Обладая значительной энергией, положительные ионы выбивают из корпуса вторичные электроны, которые, двигаясь к аноду, также ионизируют газ.

Балластное сопротивление Z автоматически снижает разность рабочих напряжений на электродах преобразователя при высоких давлениях, предотвращая тем самым возможность перехода тлеющего разряда в межэлектродном промежутке в дуговой.

Ток положительных ионов на катод и ток вторичных электронов с него в сумме численно равны электронному току в цепи анода. В результате ионизации газа возникает электрический разряд, ток которого в достаточно широком диапазоне зависит от давления. Зависимость тока разряда преобразователя I_p от давления газа $p_{изм}$ может быть выражена формулой

$$I_p = \frac{U_{х.х} - U_0}{R_6 + k^{-1} p_{изм}^{-n}}, \quad (10.14)$$

где $U_{х.х}$ — напряжение холостого хода источника питания преобразователя;

U_0 — минимальное напряжение между электродами преобразователя (корпусом и анодом) при наибольшем измеряемом давлении;

R_6 — сопротивление внешнего балластного резистора;

k — коэффициент чувствительности преобразователя;

n — показатель степени (обычно $n=0,9 \div 1,15$).

В широком диапазоне давлений, когда $U_{х.х}/I_p \gg R_6$,

$$I_p = k_p p_{изм}^n, \quad (10.15)$$

где $k_p = (U_{х.х} - U_0) k$.

Все разновидности магнитных электроразрядных преобразователей могут быть классифицированы по взаимному направлению электрического и магнитного полей на две большие группы: *преобразователи с параллельными электрическим и магнитным полями (преобразователь Пеннинга)* и *преобразователи со скрещивающимися полями*. Последняя группа в свою очередь может быть подразделена на *магнетронные* и *инверсно-магнетронные*.

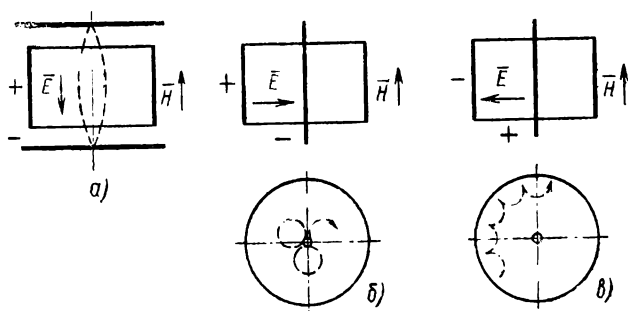


Рис. 10.15. Классификация магнитных электроразрядных преобразователей и траектории основного движения электронов в них.

а — преобразователь со взаимно параллельными электрическим и магнитным полями (преобразователь Пеннинга); *б* — магнетронный; *в* — инверсно-магнетронный преобразователь со взаимно перпендикулярными электрическим и магнитным полями, E — напряженность электрического поля; H — индукция магнитного поля.

На рис. 10.15 показаны принципиальные схемы преобразователей всех типов и траектории движения электронов в них. Для всех магнитных электроразрядных преобразователей характерно то, что прямой пролет электрона на анод запрещен благодаря применению значительного магнитного поля. В преобразователе с параллельными электрическим и магнитным полями (рис. 10.15,а) доминирует возвратно-поступательное движение электронов вдоль оси. В магнетронном и инверсно-магнетронном преобразователях электрон движется по циклоиде (рис. 10.15,б) и гипоциклоиде (рис. 10.15,в).

При своем движении до столкновения с молекулами электроны проходят громадные расстояния, исчисляемые в диапазоне высокого вакуума километрами.

Магнитные электроразрядные вакуумметры с повышенным верхним пределом измеряемых давлений

Верхний предел измеряемых давлений ограничен моментом, когда электрон между столкновениями с молекулами газа в силу малой длины свободного пути не набирает энергии, достаточной для ионизации. Вследствие этого разрядный ток перестает зависеть от давления. Сопротивление разрядного промежутка

$$R_p = k^{-1} p_{\text{изм}}^{-n}$$

становится значительно меньше балластного сопротивления R_b . При высоких давлениях, когда общий разрядный ток перестает изменяться с давлением, в разрядном промежутке имеет место расширение ионного потока, движущегося на катод. Плотность тока на периферии пучка растет с ростом давления, а в центре падает.

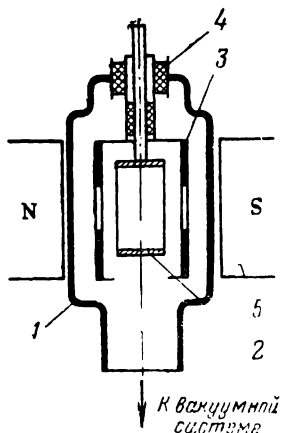


Рис. 10.16. Манометрический преобразователь магнитного электроразрядного вакуумметра с пределом измерения $5 \cdot 10^{-3} - 10^2$ Па

1 — корпус; 2 — анод; 3 — корбокатый коллектор; 4 — изолятор; 5 — магнит.

С использованием этого эффекта расширение диапазона измеряемых давлений в сторону верхнего предела до 10^2 Па может быть достигнуто размещением дополнительного электрода 3 в виде коробки с двумя отверстиями между катодом (корпусом) 1 и анодом 2 (рис. 10.16). Электрод 3, называемый коллектором, имеет отдельный вывод (через изолятор 4), что позволяет независимо измерять часть разрядного тока, проходящего через его цепи.

При высоких давлениях измерение производится в цепи коллектора 3, где проходят относительно малые токи. При давлениях меньше 1 Па вплоть до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па измеряется суммарный ток на корпус 1 и коллектор 3.

Магнитные электроразрядные вакуумметры для измерения сверхнизких давлений

Нижний предел измеряемых электроразрядными вакуумметрами давлений ограничивается трудностью возникновения разряда, а также некоторыми побочными явлениями, которые при малых разрядных токах становятся заметными: автоэлектронной эмиссией, утечками и др.

Для измерения очень низких давлений около 10^{-11} Па разработан преобразователь, имеющий конструкцию магнетрона, у которого проволочный анод расположен по оси окружающего его цилиндрического катода (см. рис. 10.15, в). Ввиду такого обращенного (по сравнению с обычными магнетронами) расположения электродов преобразователь получил название *инверсно-магнетронного*. На рис. 10.17 дается схема инверсно-магнетронного преобразователя, который состоит из цилиндрического катода 2, закрытого с торцевых сторон крышками, имеющими в центре отверстия, и анода 1 в виде

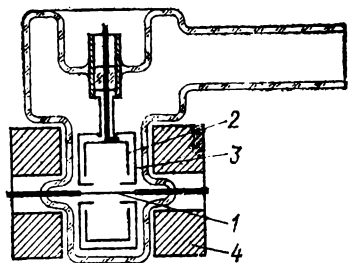


Рис. 10.17. Схема инверсно-магнетронного манометрического преобразователя.

1 — анод; 2 — цилиндрический катод; 3 — заземленный экран; 4 — постоянный магнит.

вольфрамового стержня, проходящего через эти отверстия по оси катода. Между краями отверстий в торцевых крышках катода и анода располагается заземленный экран 3. Между анодом и катодом прикладывается высокое напряжение (до 6 кВ). Преобразователь расположен в поле постоянного магнита 4.

Чувствительность такого преобразователя оказалась очень высокой благодаря следующим благоприятным факторам:

1. Под действием электрического и магнитного полей свободные электроны начинают двигаться по траекториям, близким к гипоциклоидам (см. рис. 10.15, в). При соударении с молекулой газа электрон теряет часть энергии и двигается по новой гипоциклоиде. После таких соударений электрон израсходует весь запас кинетической энергии.

тической энергии и попадет на анод. *Траектория электронов в преобразователе во много раз превышает расстояние между электродами, благодаря чему вероятность ионизации, а с нею и чувствительность преобразователя становятся чрезвычайно большими.*

2. Благодаря наличию у катода 2 торцевых крышек (с отверстиями лишь для анода) *уход электронов за пределы разрядного промежутка сильно затруднен и их потери очень малы.*

3. В отличие от ионизационных манометрических преобразователей с горячим катодом, в которых электронный ток поддерживается постоянным, в магнитных электроразрядных преобразователях электронный ток возрастает с увеличением давления. Поэтому чем ниже давление, тем слабее бомбардировка анода электронами и его рентгеновское излучение, а следовательно, тем слабее и ток фотоэмиссии с катода. *Это значит, что в магнитных электроразрядных преобразователях нижний предел измеряемых давлений не может лимитироваться током фотоэмиссии.*

4. Следует заметить, что на нижний предел измеряемых давлений существенное влияние оказывает автоэлектронная эмиссия с краев отверстий катода, которая возникает под влиянием электрического поля большой напряженности. При достаточно низких давлениях ток автоэлектронной эмиссии начинает преобладать над анодным током на катод.

Для предотвращения этого тока в цепи катода анод 1 окружен заземленным экраном 3, который своими втулками входит между анодом и краями торцевых пластин катода. Возникающая со втулок экрана автоэлектронная эмиссия не регистрируется в цепи катода и играет положительную роль как источник электронов, облегчающих зажигание разряда в преобразователе при низких давлениях

Самочищающиеся магнитные электроразрядные преобразователи

Магнитные электроразрядные преобразователи, обладающие механической прочностью и высокой чувствительностью, имеют существенный недостаток — способность к загрязнению. Особенно интенсивное загрязнение магнитного электроразрядного преобразователя наблюда-

ется при его использовании в вакуумных системах, оснащенных паромасляными диффузионными насосами.

Газовый разряд в преобразователе при энергиях ионов и электронов до 2—3 кэВ сопровождается расщеплением высокомолекулярных компонентов газовой среды, попадающих из паромасляного насоса, которые создают на электродах манометрического преобразователя пленки, искажающие результаты измерений, а со временем и вовсе срывающие работу преобразователя.

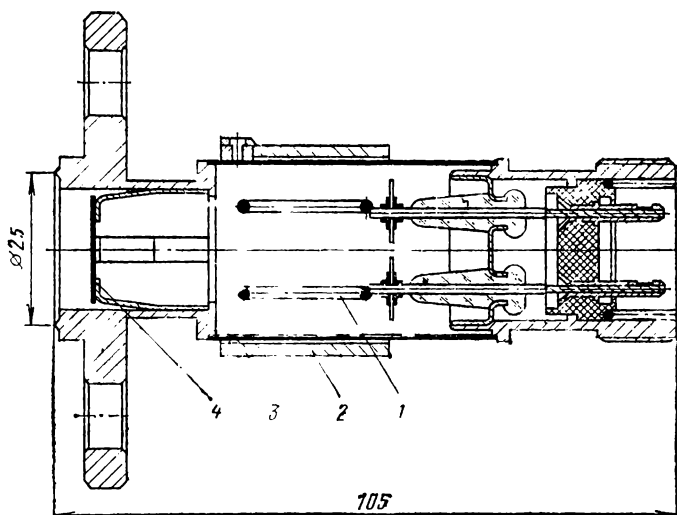


Рис. 10.18. Самоочищающийся магнитный электроразрядный преобразователь.

1 — кольцевой электрод; 2 — постоянный магнит; 3 — прямоугольная камера; 4 — механический маслоотражатель.

В результате срок службы обычных преобразователей в системах с паромасляными диффузионными насосами снижается до десятков часов.

Для работы в системах с повышенным содержанием высокомолекулярных соединений разработан *самоочищающийся преобразователь*, показанный на рис. 10.18. В прямоугольной камере 3 преобразователя установлены два электроизолированных кольцевых электрода 1. На камеру надет постоянный магнит 2. В патрубке преобразователя установлен маслоотражатель 4. Принципиальная электрическая схема питания преобразователя показана на рис. 10.19.

На центральные кольцевые электроды подается в противофазе переменное напряжение от повышающего трансформатора T_1 . Средняя точка трансформатора через измерительный прибор M_1 соединяется с коробчатым коллектором преобразователя — его корпусом. Во вторичную обмотку трансформатора T_2 включен измерительный прибор M_2 , позволяющий измерять переменный ток в цепи между кольцевыми электродами.

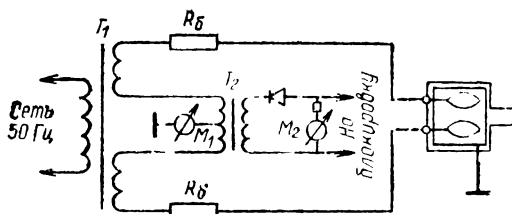


Рис. 10.19. Принципиальная электрическая схема питания самоочищающегося манометрического преобразователя.

В каждый полупериод напряжения между кольцевым электродом и ближней к нему пластиной коллектора возникает разряд, такой же по характеру, как в преобразователе Пеннинга. Образующиеся ионы частично уходят на коллектор, а частично на другой кольцевой электрод, находящийся под большим отрицательным потенциалом, т. е. в каждый полупериод одно из колец работает как анод, а другое подвергается сильной ионной бомбардировке и, следовательно, очистке. Наиболее эффективная очистка происходит при давлении 10^{-1} — 1 Па.

Особенности магнитных электроразрядных вакуумметров

Отметим наиболее важные особенности этих вакуумметров:

1. Магнитные электроразрядные преобразователи не содержат в своей конструкции накаливаемых деталей, вследствие чего не боятся окисления и могут включаться при любом давлении в вакуумной системе.

2. В силу большой устойчивости преобразователей к внешним воздействиям и простоты эксплуатации магнитные электроразрядные вакуумметры нашли широкое

распространение для управления технологическими процессами.

3. При измерении давления магнитными электро-разрядными вакуумметрами наблюдается *откачка газов* самим преобразователем, обусловленная сильным электрическим поглощением газа в объеме прибора. Откачивающее действие преобразователя изменяет давление в системе, а при наличии трубопровода с малой проводимостью между откачиваемым сосудом и преобразователем может существенно исказить результаты измерений.

4. При высоких давлениях в вакуумной системе наблюдается *катодное распыление* материала под влиянием бомбардировки катода интенсивным хорошо сфокусированным пучком ионов. Это приводит к запылению электродов и изоляторов преобразователя и как результат — к возникновению тока утечки между электродами, что также искажает результаты измерения.

10.8. ПРАКТИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ

Присоединение манометрических преобразователей к вакуумной системе

Тепловые преобразователи должны устанавливаться по возможности вдали от источников тепла с тем, чтобы температура корпуса преобразователя была в пределах 288—298 К.

Допускается работа *электронных ионизационных преобразователей* во внешних магнитных полях с напряженностью не более 0,015 А/м. Если напряженность магнитного поля превышает это значение, то электронные ионизационные манометрические преобразователи необходимо защищать экраном из ферромагнитного материала.

Магнитные электроразрядные манометрические преобразователи необходимо устанавливать так, чтобы магнит преобразователя был удален от ферромагнитных тел на расстояние не менее 0,2 м.

Применяемое уплотнение не должно давать потоков газовой диффузии или диффузии газа через него, которые могут исказить отсчет давления в обследуемой системе. В диапазоне высокого вакуума предпочтительны, а сверхвысокого — обязательны применение металличе-

ского уплотнителя или напайка стеклянного преобразователя на систему. Во всех случаях требуется тщательная проверка герметичности соединения преобразователя с вакуумной системой.

Отсчет давлений

Шкалы вакуумметров отградуированы в единицах давления, относительных или электрических единицах. В последних **двух случаях к вакуумметрам** прилагается градуировочная кривая или указывается их чувствительность по давлению. Метрические характеристики вакуумметров косвенного действия приведены для азота (сухого воздуха). При измерении давления других газов следует пользоваться градуировочными кривыми по этим газам или соответствующими пересчетными коэффициентами относительной чувствительности. Давление газа в полости манометрического преобразователя:

$$p = p_{\text{изм}} / \alpha_r, \quad (10.16)$$

где α_r — относительная чувствительность;

p — давление газа в полости манометрического преобразователя;

$p_{\text{изм}}$ — отсчет давления вакуумметром.

В приложении 10 приведены значения относительной чувствительности некоторых манометрических преобразователей.

Относительная чувствительность *ионизационных вакуумметров* для смеси газов может быть определена по уравнению

$$\alpha_{r.c.m} = \alpha_{r1}\beta_{r1} + \alpha_{r2}\beta_{r2} + \alpha_{r3}\beta_{r3} + \dots, \quad (10.17)$$

где $\alpha_{r1}, \alpha_{r2}, \alpha_{r3} \dots$ — относительные чувствительности;

$\beta_{r1}, \beta_{r2}, \beta_{r3}$ — относительные концентрации газов.

Очистка и обезгаживание преобразователей

На работу преобразователей и достоверность измерения давления резко влияет загрязненность прибора.

Загрязнение изоляторов преобразователя шунтирует входную цепь усилителя, занижая показания давления. Эти загрязнения происходят как со стороны вакуумной полости, так и с атмосферной стороны.

Цепь, замыкающую изолятор изнутри, часто удается разрушить искровым течеискателем. Иногда причиной неожиданных утечек по изоляторам сверхвысоковакуум-

ных преобразователей является повышенная влажность в помещении.

В газовой атмосфере вакуумных установок всегда присутствуют в большем или меньшем количествах легко конденсирующиеся высокомолекулярные соединения. Особенно это характерно для установок, работающих в диапазоне низкого и среднего вакуума. Эти соединения загрязняют электроды манометрического преобразователя и со временем искажают его метрические характеристики. Загрязненные преобразователи промывают бензином или этиловым спиртом и сушат.

Часто для защиты преобразователей от паров масел и других конденсирующихся веществ используют низкотемпературные охлаждаемые ловушки (см. гл. 9). При этом вакуумметр *измеряет давление только тех газов, которые не конденсируются при температуре ловушки, и измеренное давление, отсчитываемое вакуумметром, будет ниже полного давления в вакуумной системе.*

Для снижения газовыделения преобразователя его необходимо обезгазить прогревом. Возможны следующие виды прогрева преобразователей:

- внешней печью до температуры не более 700 К;
- электронной бомбардировкой;
- пропусканием электрического тока по анодной сетке и другим накаливаемым элементам.

Одновременный прогрев внешней печью и электронной бомбардировкой, как правило, недопустим. Под воздействием высоких напряжений нагретое стекло легко подвергается электролизу с образованием неустраняемых утечек и нарушением герметичности.

Не рекомендуется также прогревать преобразователи при давлении выше 10^{-2} Па.

Сорбционно-десорбционные эффекты

В диапазоне высокого и сверхвысокого вакуума необходимо учитывать сорбционно-десорбционные явления в манометрическом преобразователе, в вакуумной системе и соединительных трубопроводах и стремиться к исключению их влияния на измерение давления. Преобразователь, если он не открытого типа, соединен с обследуемой системой через трубопровод. При этом между преобразователем и вакуумной системой может быть перепад давлений, вызванный ограниченной проводимостью.

мостью трубопровода и тем, что преобразователь может выделять или откачивать газ.

Давление в вакуумной системе p_c определяется следующим образом:

если преобразователь выделяет газ,

$$p_c = p_{\text{изм}} - Q'/U; \quad (10.18)$$

если преобразователь откачивает газ,

$$p_c = p_{\text{изм}} \left(1 + \frac{S_m}{U} \right), \quad (10.19)$$

где $p_{\text{изм}}$ — отсчет давления вакуумметром;

Q' — поток газа из преобразователя;

S_m — быстрота откачивающего действия преобразователя;

U — проводимость соединительного трубопровода.

Для уменьшения перепада давлений $p_c - p_{\text{изм}}$ необходимо, чтобы соединительный трубопровод был максимально коротким и наибольшего возможного диаметра.

Инерционность отсчета давления

Как показывает практика, давление газа в системе всегда изменяется во времени. Перепад давления на трубопроводе, соединяющем преобразователь с вакуумным сосудом, переходные процессы в самом преобразователе и инерционность измерительного блока будут давать при измерении изменяющихся давлений дополнительную погрешность.

Инерционность процессов характеризуется постоянной времени τ_b . В течение периода, равного трем постоянным времени $3\tau_b$, давления в объеме преобразователя и в вакуумной системе практически выравниваются, относительная разность давлений составляет около 5%.

Постоянная времени манометрического преобразователя

$$\tau_b = V/U, \quad (10.20)$$

где V — объем преобразователя;

U — проводимость трубопровода, соединяющего преобразователь с вакуумной системой.

Снижению постоянной времени способствует применение преобразователей с малым собственным объемом и коротким соединительным трубопроводом. Так, постоянная времени открытых преобразователей, размещенным непосредственно в откачиваемом сосуде, со-

ставляет менее 10^{-3} с. Инерционность переходных электрических процессов в ионизационных манометрических преобразователях практически можно не учитывать, так как эти процессы определяются временем около 10^{-6} с. Инерционность срабатывания блокировочных устройств вакуумметров определяется инерционностью преобразователя и его входных цепей.

Постоянная времени входных цепей усилителей постоянного тока сверхвысоковакуумных вакуумметров, определяющая инерционность измерительных блоков, равна произведению сопротивления входной цепи на ее емкость. Быстродействие электромагнитных реле, широко используемых в вакуумметрах, составляет около 10^{-2} с.

Глава одиннадцатая

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ ГАЗОВ

11.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

Приборы для измерения парциальных давлений газов называются *газоанализаторами* или *масс-спектрометрами*.

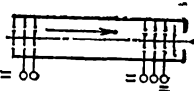
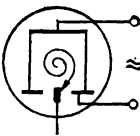
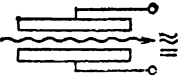
Принцип действия почти всех наиболее широко применяемых высоковакуумных масс-спектрометров основан на ионизации анализируемого газа. При этом образовавшиеся положительные ионы разделяются по характерному для каждого из них отношению массы иона к его заряду M/e .

Отношение M/e носит название «массовое число иона».

Для однозарядных ионов ($e=1$) массовые числа совпадают с их молекулярными массами (в целых числах) и выражаются в атомных единицах массы [атомная единица массы (а. е. м.) равна $1/12$ массы атома изотопа углерода C^{12}]. Отметим, что число однозарядных ионов получается во много раз больше числа всех ионов с числом зарядов, отличающимся от единицы. Поэтому часто считают $M/e=M$.

После разделения ионы поступают на коллектор масс-спектрометра и создают в его цепи ток, пропор-

Основные характеристики высоковакуумных

Тип прибора	Принципиальное устройство анализатора	Метод разделения ионов
Статический масс-спектрометр с магнитной разверткой		В постоянном электрическом и магнитном полях
Времяпролетный масс-спектрометр (хронотрон)		Во время пролета за счет разницы скоростей
Омегатронный измеритель парциальных давлений		В постоянном магнитном и переменном электрическом полях
Квадрупольный и монополярный масс-спектрометры		В переменном электрическом поле

циональный давлению. Таким образом, датчик масс-спектрометра должен состоять из трех основных узлов: *источника ионов, анализатора и приемника ионов.*

По принципу действия все наиболее распространенные масс-спектрометры классифицируют следующим образом:

1. *Статические масс-спектрометры*, в которых разделение ионов осуществляется с помощью постоянных или медленно изменяющихся магнитного и электрического полей, причем период изменения полей много больше времени движения ионов в анализаторе.

2. *Времяпролетные масс-спектрометры*, в которых разделение ионов в анализаторе происходит во время их пролета в пространстве, свободном от электрического и

Масс-спектрометрические газоанализаторы

Средняя относительная погрешность, %	Рабочий диапазон давлений, Па	Диапазон анализируемых масс	Основное назначение и применение
1: более 99	$10^{-2} - 10^{-9}$	1—200	Количественный анализ. Масс-спектрометрические течеискатели
100	$10^{-2} - 10^{-8}$	1—600	Исследование газовой кинетики. Большие вакуумные системы
40	$10^{-3} - 10^{-9}$	1—250	Измерение парциальных давлений. Вакуумные системы откачных постов и других технологических установок. Электровакуумные и другие вакуумные приборы
Большее, чем в вакууме	$10^{-2} - 10^{-10}$	1—300	То же

магнетного поля. Масс-спектрометры этого типа называются также *хроматографами*.

3. *Радиочастотные масс-спектрометры*, в которых характер движения ионов, например частота колебаний, находится в определенном соответствии с приложенным высокочастотным напряжением:

а) *Омега-тронный* измеритель парциальных давлений (омега-трон);

б) *квадрупольный* (электрический фильтр масс) и *мониторный масс-спектрометры*.

Кроме наиболее широко распространенных масс-спектрометрических газоанализаторов, известны *десорбционный* спектрометр, в котором измеряется давление газа десорбирующихся с нити при повышении ее тем-

пературы, а также приборы для контроля парциального давления только отдельных компонентов газовой смеси.

Теперь кратко рассмотрим наиболее важные параметры, характеризующие масс-спектрометры.

Основными параметрами газоанализаторов являются *чувствительность, разрешающая способность, диапазон анализируемых масс и минимальное регистрируемое давление.*

Чувствительность. Чувствительность выражает минимально определяемое парциальное давление газа. Чувствительность зависит от характеристик датчика масс-спектрометра и возможностей измерительной схемы. Чувствительность масс-спектрометров, как и манометрических преобразователей, может быть выражена в $1/\text{Па}$ или $\text{А}/\text{Па}$. Для статических масс-спектрометров чувствительность часто выражается в долях процента и показывает, какую долю отдельного компонента в общем составе газа способен обнаружить данный прибор. Принципиально чувствительность масс-спектрометрических газоанализаторов неодинакова для разных газов. Чтобы избежать дополнительных ошибок, связанных с переводом отсчета в парциальные давления, запись компонентов нередко производится непосредственно в единицах тока или напряжения, а их соотношение характеризует относительный состав анализируемого газа.

Разрешающая способность. Разрешающая способность для масс-спектрометрических газоанализаторов представляет собой отношение массового числа M к наименьшему различаемому изменению массового числа ΔM , т. е. разрешающая способность численно равна массовому числу, при котором могут быть полностью разделены соседние массы, отличающиеся друг от друга на единицу. Наибольшую разрешающую способность имеют статические масс-спектрометры с магнитным разделением ионного луча. Для обычных вакуумных измерений достаточна разрешающая способность до 50.

Диапазон анализируемых масс. Для вакуумных измерений достаточен диапазон масс от 2 до 50—100.

Диапазон рабочих давлений всех масс-спектрометров ограничен по существу одними и теми же причинами. Нижняя граница рабочего диапазона определяется трудностью выделения небольшого пика рабочего газа

над фоновым отсчетом. Верхняя граница рабочего диапазона определяется отклонением от линейного закона зависимости тока ионов анализируемого компонента от давления.

В табл. 11.1 приведены основные характеристики и рекомендуемые области применения масс-спектрометров, использующихся в вакуумной технике.

11.2. СПЕКТР МАСС И ЕГО РАШИФРОВКА

На рис. 11.1 изображена спектрограмма одного из масс-спектрометров, на которой показана зависимость выходного сигнала газоанализатора $I_{и}$ от массового числа M/e некоторых газов. Масс-спектрограмма получена при плавной непрерывной развертке по массам и записи выходного сигнала.

Амплитуды пиков ионных токов, показанных на рис. 11.1, пропорциональны парциальным давлениям отдельных компонентов, ионизирующему электронному току и чувствительности газоанализатора к соответствующему компоненту:

$$I_{и} = s_m \alpha_r I_e p, \quad (11.1)$$

где $I_{и}$ — амплитуда пика;

s_m — чувствительность по азоту;

α_r — относительная чувствительность;

I_e — электронный ионизирующий ток;

p — парциальное давление компонента.

В масс-спектрометрах, например в омегатронном, пики ионов определенных массовых чисел выделяются над уровнем фонового тока. Фоновый ток вызван следующими основными причинами: рассеянием ионов в камере анализатора, недостаточной фокусировкой электронного и ионного потоков, нестабильностью питания, наводками и шумами в цепи усиления. Понятно, что отсчет пика производится от среднего уровня фона.

Относительная чувствительность масс-спектрометрических газоанализаторов к разным газам пропорциональна вероятности ионизации газов и практически совпадает с относительной чувствительностью ионизационных манометрических преобразователей (см. приложение 10).

Развертка по массовым числам выделяет пики, которые характеризуются отношением массы иона к его заряду.

Рассмотрим некоторые общие для всех масс-спектрометрических газоанализаторов явления, влияющие на вид спектрограммы.

Электронный луч и нагретый катод производят диссоциацию сложных молекул газа на более простые составляющие, которые также ионизируются и дают в спектре соответствующие пики ионов. Например, в спектре CO_2 наблюдаются пики CO_2^+ , CO^+ , C^+ , O^+ , O_2^+ .

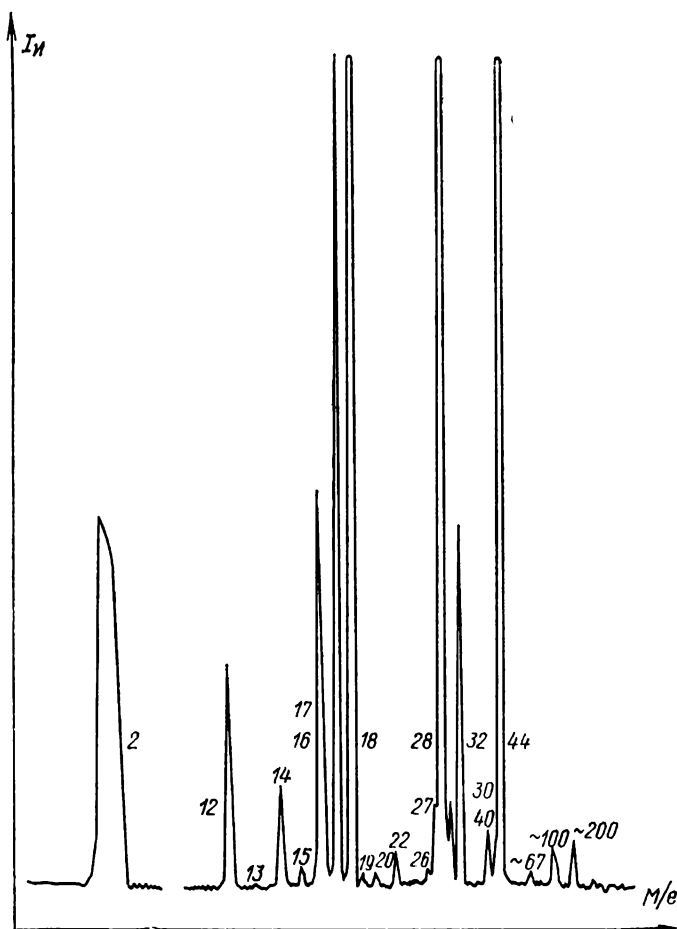


Рис. 11.1. Спектр масс.

Пик с одним и тем же массовым числом может принадлежать разным веществам. Массовое число 16 присуще как метану CH_4^+ , так и атомарному кислороду O^+ , массовое число 28 — азоту N_2^+ и окиси углерода CO^+ . Различать их можно по наличию дополнительных соответствующих компонентов в масс-спектре.

Органические соединения дают большое число осколочных пиков. У сложных соединений преобладают осколочные пики, по которым можно с известной степенью приближения составить лишь представление об исходном продукте. Плохое удаление органических растворителей после промывки аппаратуры дает наибольший пик для этилового спирта и диэтилового (серного) эфира в районе массового числа 31, а для ацетона — в районе массового числа 43.

Минеральные масла диффузионных насосов дают серии пиков углеродсодержащих соединений, начиная с метановых производных до молекулярной массы самих масел. Наибольшие по амплитуде пики соответствуют, как правило, этан-пентановым производным (2—5 углеродных атомов).

Наличие кислорода в спектре остаточных газов герметичных высоковакуумных систем не характерно. Кислород со всегда имеющимися в приборе углеродными загрязнениями дает преимущественно CO (массовое число 28) и CO_2 (массовое число 44). Натекание воздуха через течь дает параллельный рост пиков азота (массовое число 28), кислорода (массовое число 32) и аргона (массовое число 40).

После установки рабочего режима газоанализатора проводится его градуировка, заключающаяся в определении чувствительности прибора к разным газам. В систему с датчиком газоанализатора последовательно напускают ряд известных газов. При нескольких значениях давления впущенного газа определяется чувствительность — *отношение приращенния выходного сигнала газоанализатора к соответствующему приращению давления данного газа*. Давление газа в диапазоне 10^{-2} — 10^{-8} Па наиболее удобно определять по ионизационному вакуумметру. Определив указанным образом среднюю чувствительность масс-спектрометрического газоанализатора по одному газу, можно (см. приложение 10) подсчитать его ориентировочную относительную чувствительность для некоторых других газов.

Одновременно отмечают места пиков ионов данного газа на масс-спектрограмме (хронотрон) или рабочие параметры: например частоту для омегатрона, при которых на коллектор масс-спектрометра поступают ионы с данным массовым числом. Дополнительно можно отметить положение или рабочие параметры для некоторых характерных пиков ионов: паров воды (массовые числа 18 и 17) в непрогретой системе, водорода (массовое число 2) в системе с паромасляным насосом, ртути (массовое число 200) в системе с парортутным насосом. Зная местоположение или рабочие параметры прибора для пиков ионов с известными массовыми числами, можно определить места появления или рабочие параметры пиков ионов с другими массовыми числами.

11.3. СТАТИЧЕСКИЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ИОНОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Широко распространенные масс-спектрометры с разделением ионов в магнитном поле представляют собой стационарные приборы, предназначенные для анализа газов, паров, жидкостей, твердых веществ и выявления их относительного содержания в газовой смеси.

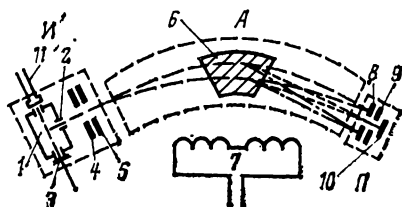


Рис. 11.2. Принципиальная схема аналитической части статического масс-спектрометра с разделением ионов в магнитном поле.

И — источник ионов; *А* — анализатор; *П* — приемник ионов; *1* — коробка ионизатора; *2* — выходная щель; *3* — коллектор электронов; *4, 5* — пластины; *6* — магнит; *7* — катушка магнита; *8* — входная щель; *9* — супрессорная сетка; *10* — коллектор; *11* — катод.

Статические масс-спектрометры серии МХ предназначены для химического анализа, серии МИ — изотопного, серии МВ — относятся к приборам с весьма высокой разрешающей способностью. Принципиально устройство камер статического масс-спектрометра с разделением ионов в магнитном поле показано на рис. 11.2.

В источнике ионов *И* ионизация газа производится пучком медленных электронов, эмиттируемых накален-

ным катодом 11. Часть образовавшихся при ионизации положительных ионов вытягивается из ионизатора через узкую щель 2, ускоряется и дополнительно фокусируется путем установленных рядом пластин 4, 5 так, что на выходе из источника ионы движутся весьма узким пучком. Все ионы имеют одну и ту же энергию $U_{\text{уск}}$, но разные скорости u_n в соответствии с их массой m и зарядом e :

$$u_n = \sqrt{\frac{2U_{\text{уск}}}{m/e}}. \quad (11.2)$$

Попадая в зону действия магнита 6, поле которого перпендикулярно направлению движения частиц, ионы изменяют направление своего движения под влиянием лоренцевой силы. Радиус траектории ионов, движущихся в однородном магнитном поле с индукцией B :

$$r = \frac{m}{e} \frac{u_n}{B}, \quad (11.3)$$

или

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2m}{e} U_{\text{уск}}}. \quad (11.4)$$

Изменяя ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}}$ или индукцию магнитного поля B , можно последовательно направить во входную щель приемника ионы разных масс. В выпускаемых масс-спектрометрах применяется преимущественно магнитное разделение ионов по массовым числам. В приборах с большой разрешающей способностью используется неоднородное магнитное поле. Угол между направлениями ионного потока в выходной щели 2 и входной щели 8 характеризует угол развертки анализатора. Обычно *угол развертки* газоаналитических масс-спектрометров 90, 120 или 180°.

Давление в камере анализаторов во избежание рассеяния ионов из-за столкновений с молекулами газа должно быть не выше 10^{-3} Па.

Коллектор 10 в приемнике ионов устанавливается за узкой щелью. Чем уже входная щель, тем более узкий пучок ионов отбирает коллектор без смешения с потоком ионов ближайшей массы, но тем меньше и токи в цепи коллектора. Почти всегда в масс-спектрометрах с магнитным разделением ионов применяются сменные или регулируемые по ширине диафрагмы приемника ионов.

Ионный ток коллектора усиливается электрометрическим усилителем или электронным множителем и измеряется стрелочным прибором. При необходимости усиленный сигнал подается для записи на самопишущий потенциометр.

Во всех масс-спектрометрических течеискателях используют принцип статического масс-спектрометра с разделением ионов в магнитном поле.

11.4. ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР (ХРОНОТРОН)

Работа времяпролетного масс-спектрометра основана на разделении ионов по времени пролета в свободном от электрических и магнитных полей пространстве. Времяпролетный масс-спектрометр часто называют так же импульсным масс-спектрометром или хронотроном

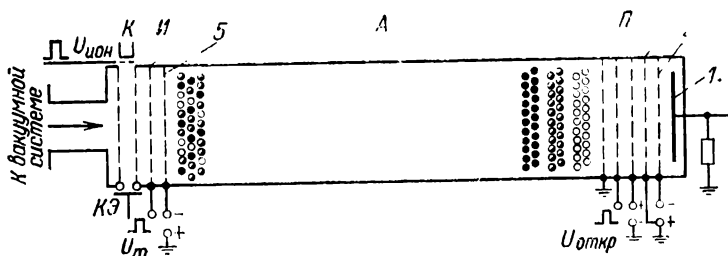


Рис. 11.3. Камера времяпролетного масс-спектрометра.

○ — ионы массы M_1 ; ● — ионы массы M_2 ; ● — ионы массы M_3 ; И — источник ионов; П — приемник ионов; А — анализатор; К — катод; КЭ — коллектор электронов; U_m — вытягивающее напряжение; $U_{откр}$ — открывающее напряжение; 1 — коллектор ионов; 2 — антидифракционная сетка; 3 — супрессорная сетка; 4 — вытягивающая сетка; 5 — ускоряющая сетка.

Принципиальное устройство камеры-датчика прибора^{*} приведено на рис. 11.3. Источник ионов И выдает в анализатор — пространство дрейфа А — пачки ионов. Пачку ионов можно получить как импульсной ионизацией электронным потоком путем подачи импульса $U_{ион}$ длительностью 10^{-7} — 10^{-8} с, так и подачей на выталкивающий электрод или вытягивающую диафрагму 4 импульса напряжения U_m той же длительности при постоянном электронном потоке. Пройдя ускоряющее напряжение $U_{уск}$, которое подается на сетку 5, ионы движутся в анализаторе в сторону коллектора ионов 1 по инерции, при этом скорость движения отдельных ионов зависит от их энергии и массового числа. Время пролета ионов t от источника И до приемника ионов П

вдоль всего пространства дрейфа A длиной l определяется из уравнения

$$t = l \sqrt{\frac{m}{e} \frac{1}{2U_{\text{уск}}}}. \quad (11.5)$$

В анализаторе по мере продвижения от источника до коллектора ионы *разделяются на группы в соответствии с их массовым числом*. Первыми достигнут коллектора ионы легких газов и за ними последовательно группы ионов более тяжелых газов. Попадая на коллектор 1 , группы ионов создают в его цепи ток, пропорциональный числу ионов, т. е. парциальному давлению. Усиленный сигнал подается на осциллограф, частота развертки которого синхронна с частотой повторения ионизирующих импульсов.

В приемнике ионов перед коллектором 1 обычно устанавливается система сеток, ближайшая из которых к коллектору является антидинаatronной (сетка 2). Остальные сетки позволяют при необходимости из всего потока ионов отбирать и пропускать на коллектор 1 только ионы определенного массового числа или диапазона массовых чисел. Это осуществляется подачей на сетки открывающих и закрывающих импульсов, сфазированных со временем ионизирующего импульса. Супрессорная сетка 3 не пропускает на коллектор рассеянные ионы, энергия которых ниже энергии ионов в группе.

Разрешающая способность прибора

$$\frac{M}{\Delta M} = \frac{t}{2\Delta t}, \quad (11.6)$$

где Δt — время, в течение которого ионы данной массы проходят на приемник; это время пропорционально толщине ионных групп у коллектора ионов.

На времяпролетных масс-спектрометрах удается получить разрешающую способность до 100 и в отдельных приборах даже до 200.

Применение электронного умножителя для усиления импульсов ионного тока обеспечивает измерение давлений до 10^{-7} Па.

Времяпролетный масс-спектрометр нашел широкое применение для анализа быстро изменяющегося состава газов в высоковакуумных системах. Существенным преимуществом этого прибора является отсутствие магнитного поля.

11.5. ОМЕГАТРОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ

Омегатронный измеритель парциальных давлений, или просто омегатрон, является одним из самых распространенных газоанализаторов.

На рис. 11.4 схематически изображено устройство омегатронной лампы или датчика без оболочки, а на рис. 11.5 общий вид датчика.

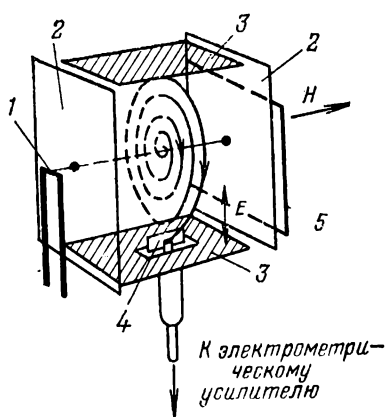


Рис. 11.4. Принципиальная схема датчика омегатронного измерителя парциальных давлений.

1 — термокатод; 2 — улавливающие пластины; 3 — высокочастотные пластины; 4 — коллектор ионов; 5 — коллектор электронов; E — напряженность высокочастотного электрического поля; H — индукция магнитного поля.

Датчик состоит из термокатода 1, двух улавливающих пластин 2, высокочастотных электродов 3 также в виде пластин, коллектора ионов 4 и коллектора электронов 5. Эмиттируемые катодом электроны узким пучком проходят через отверстия в пластинах 2 и попадают на положительно заряженный коллектор электронов 5. Образовавшиеся вследствие ионизации положительные ионы с различными массовыми числами попадают под одновременное воздействие взаимно перпендикулярных полей — высокочастотного электрического поля напряженности E, приложенного между пластинами 3 (с частотой f), и постоянного магнитного

поля с индукцией B от внешнего магнита (на рисунке не показан). Магнит устанавливается таким образом, чтобы поле было направлено строго параллельно электронному пучку; это необходимо для фокусировки пучка.

Одно лишь высокочастотное поле заставляет ионы совершать колебательное движение между пластинами; одно только магнитное поле заставляет их двигаться по круговым траекториям, в плоскостях, перпендикулярных направлению магнитного поля. Частота вращения ионов ω равна:

$$\omega = \frac{B}{m/c} \quad (11.7)$$

При одновременном воздействии обоих полей можно подобрать такое соотношение между f и B , чтобы ионы определенного массового числа M/e совершали обороты в фазе с высокочастотным полем, т. е. чтобы *соблюдалось условие резонанса между собственной частотой вращения ионов и частотой электрического поля*.

Часть ионов, собственная частота вращения которых совпадает с приложенной между высокочастотными пластинами частотой электрического поля, на каждом обороте приобретает дополнительную энергию от высо-

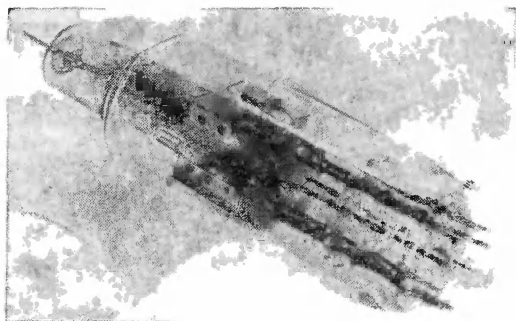


Рис. 11.5. Омегатронный датчик в стеклянном исполнении.

кочастотного поля, за счет чего радиус траектории их движения увеличивается. В результате ионы, обладающие частотой вращения, совпадающей с частотой высокочастотного напряжения, движутся по спирали. Это продолжается до тех пор, пока ионы не попадут на расположенную поперек их движения пластину коллектора ионов 4. Ионы других массовых чисел, собственная частота вращения которых отличается от частоты приложенного напряжения, затормаживаются при вращении и рекомбинируют на улавливающих пластинах 2. По току в цепи коллектора ионов 4 можно судить о парциальном давлении резонансного массового компонента газа. Изменяя частоту высокочастотного напряжения, получают данные о парциальном составе смеси газов.

Между разрешающей способностью и массовым числом анализируемого газа M/e имеется зависимость

$$\frac{M}{\Delta M} = \frac{1}{Mm'e} \frac{rB^2}{2E} \quad (11.8)$$

или

$$\frac{M^2}{\Delta M} = \text{const}, \quad (11.9)$$

где r — расстояние от оси прибора (электронного луча) до коллектора ионов;

m' — масса атома водорода;

$E_{\sim}$ — напряженность высокочастотного электрического поля.

Таким образом, чем меньше массовое число M/e , тем выше разрешающая способность омегатрона, и наоборот.

Пример 11.1. Определить разрешающую способность омегатрона в области 44 массового числа (CO_2), если известно, что для $M=20$ разрешающая способность прибора равна 20.

Из уравнений (11.8) и (11.9) можно записать:

$$\frac{M}{\Delta M} M = 20^2 = \text{const};$$

$$\Delta M = \frac{44^2}{20^2} \approx 4,8$$

Аргон, имеющий массовое число 40, при наличии углекислого газа ($M=44$) определяется с трудом.

В омегатроне камера ионизации является одновременно анализатором ионов. Это обеспечивает наиболее полное использование ионов, а следовательно, и высокую чувствительность омегатрона.

Для более точного определения чувствительности необходима индивидуальная градуировка прибора совместно с блоком питания. Относительная чувствительность омегатрона к разным газам практически такая же, как и для электронного ионизационного преобразователя (см. приложение 10).

Необходимо отметить, что при работе с газами с большими массовыми числами действительная резонансная частота высокочастотного напряжения омегатрона несколько выше расчетной из-за влияния поля улавливающих пластин и других причин.

При работе прибора в сверхвысоком вакууме предъявляются чрезвычайно высокие требования к чистоте поверхностей электродов. Загрязнение электродов, помимо искажения парциального состава газа, может привести к отклонению рабочих характеристик прибора.

При работе с паромасляными диффузионными насосами электроды омегатрона достаточно быстро загряз-

няются и очистка прибора прогревом токами высокой частоты не всегда эффективна. В таком случае омегатрон приходится заменять новым. Восстановить свойства умеренно загрязненного парами масла омегатрона удастся промывкой датчика в кипящем четыреххлористом углероде. После этого омегатрон следует промыть горячей дистиллированной водой и этиловым спиртом.

11.6. КВАДРУПОЛЬНЫЙ И МОНОПОЛЯРНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ (ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ МАСС)

Квадрупольный масс-спектрометр

Этот прибор имеет ряд преимуществ по сравнению с описанными выше анализаторами и получает все большее распространение для контроля газовой среды в вакуумных системах. Прибор способен анализировать парциальный состав газов до давления 10^{-1} Па при достаточно высокой разрешающей способности (до 100 и более).

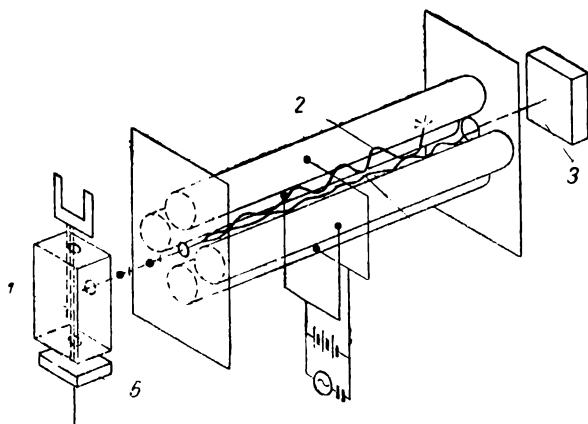


Рис. 11.6 Принципиальная схема квадрупольного масс-спектрометра. 1 — ионизирующий пучок электронов; 2 — раскачиваемый ион; 3 — коллектор ионов; 4 — нераскачиваемый ион; 5 — коллектор электронов.

Принципиальная схема прибора приведена на рис. 11.6. Исследуемый газ ионизируется в источнике ионов и выталкивается в виде ионного пучка через диафрагму в пространство анализатора. Отфильтрованные в анализаторе ионы определенной массы дают в цепи коллектора 3 ток, пропорциональный давлению.

В анализаторе прибора разделение ионов по массам происходит за счет действия квадрупольного электрического поля, создаваемого четырьмя параллельными цилиндрическими стержнями, к которым приложены переменное напряжение вида $U_{\sim} \cos \omega t$ и постоянное напряжение $U_{=}$. При этом в области поперечного сечения, близкой к продольной оси прибора z , создается гиперболическое электрическое поле.

Заряженная частица, двигающаяся вдоль оси прибора z , будет раскачиваться высокочастотным полем, причем амплитуда колебаний зависит как от массового числа ионизированной частицы, так и от напряжения на стержнях. Ионы, амплитуда колебаний которых остается меньше r_0 , могут беспрепятственно проходить через квадрупольное поле. Можно подобрать параметры поля так, что в зависимости от подаваемого напряжения через фильтр будут проходить ионы одной определенной массы. При условии, что соотношение амплитуд

$$U_{=}/U_{\sim} \leq 0,167, \quad (11.10)$$

массовое число M прошедших через фильтр ионов определяется как

$$M = \frac{U}{\omega^2 r_0^2} \text{const}, \quad (11.11)$$

где r_0 — расстояние от оси z до вершины гиперболы (до стержня).

Чувствительность прибора определяется эффективностью ионизации газа в источнике, выходом ионов из источника в анализатор и его фильтрующими свойствами. Все эти факторы взаимно связаны. Разрешающая способность возрастает с массой иона таким образом, что разрешение ΔM по всему диапазону масс остается постоянным. Установка вторичного электронного умножителя за отверстием приемника ионов увеличивает чувствительность и скорость индикации ионного тока.

Монополярный масс-спектрометр

Монополярный масс-спектрометр представляет собой одну четвертую часть квадрупольного масс-спектрометра (рис. 11.7). Устройство ионного источника и

приемника ионов монополярного масс-спектрометра аналогично устройству этих узлов квадрупольного масс-спектрометра. Анализатор датчика состоит из круглого стержня 2 и пластины уголкового профиля 1. Уголок находится под потенциалом земли, а на стержень подается напряжение вида

$$U = U_0 + U_1 \cos \omega t.$$

В зазоре между электродами распределение потенциалов имеет тот же вид, что и для квадрупольного масс-спектрометра. Принцип работы анализатора такой же, как и в квадрупольном масс-спектрометре. Однако при прочих равных условиях монополярный масс-спек-

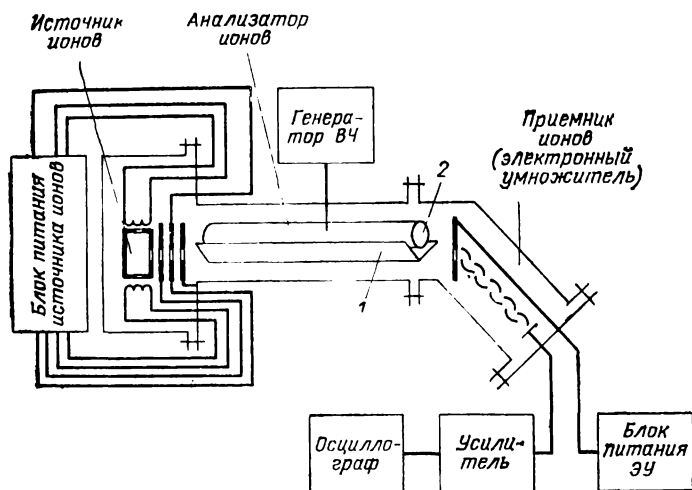


Рис. 11.7. Принципиальная схема монополярного масс-спектрометра.

трометр по сравнению с квадрупольным имеет более высокую разрешающую способность в широком диапазоне прикладываемых к анализатору напряжений. Как и квадрупольный, монополярный масс-спектрометр нечувствителен к энергии инжектируемых ионов в довольно широком диапазоне, что позволяет также использовать электроразрядный источник ионов.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

12.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ

Одним из важнейших параметров вакуумных систем является *давление, которое определяется балансом газовых потоков, поступающих в вакуумную систему и удаляемых из нее*. Поэтому при проведении различных технологических процессов в вакууме важно знать поток откачиваемых газов. Так, предельное остаточное давление в динамической вакуумной системе (т. е. при непрерывной откачке) определяется собственным газовыделением, которое характеризуется потоком откачиваемых газов. В изолированной (отпаянной) вакуумной системе время сохранения достигнутого в процессе откачки давления [применительно к электровакуумным приборам (ЭВП) — сохраняемость] также зависит от газовыделения и, следовательно, полностью определяется потоком газа.

По потоку газа Q' можно определить давление p_1 в полости откачиваемого через штенгель электровакуумного прибора. В этом случае

$$p_1 = p_2 + \Delta p = p_2 + \frac{Q'}{U}, \quad (12.1)$$

где p_2 — давление в вакуумной системе;

Δp — перепад давления на штенгеле;

Q' — поток газа, протекающий через штенгель;

U — проводимость штенгеля.

Контроль потока из ЭВП позволяет *оптимизировать* процесс его обработки, т. е. провести качественную откачку и обезгаживание за минимальное время.

Данные о потоке необходимы при определении характеристик вакуумных насосов (см. гл. 8), измерении проводимости вакуумных элементов, при исследовании газовыделения конструкционных материалов и при решении других задач.

Поток газа характеризует количество переносимого вещества $\Delta(pV)$ за промежуток времени Δt :

$$Q' = \frac{\Delta(pV)}{\Delta t}. \quad (12.2)$$

Соотношения между разными единицами измерения потока приведены в табл. 12.1.

Соотношение между различными единицами измерения потока разреженного газа

Единицы измерения	м ³ ·Па/с=Вт	л·мм рт. ст/с	л·мм рт. ст/с	см ³ ·атм/с
$\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}} = \text{Вт}$	1	7,5	$7,5 \cdot 10^3$	10
л·мм рт. ст/с	0,133	1	10^3	1,32
л·мм рт. ст/с	$1,33 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$
см ³ ·атм/с	0,10	0,75	750	1

Ниже будут рассмотрены методы измерения потока газа при давлениях меньше 10 Па, хотя некоторые методы измерения потока разреженного газа в основе своей базируются на аналогичных измерениях потока при высоких давлениях.

Погрешность измерения потока разреженного газа обычно составляет от -50 до $+100\%$ и во многом обусловлена сорбционно-десорбционными процессами и погрешностью определения расчетных величин давления.

К методам и аппаратуре для измерения потока разреженного газа предъявляются следующие требования: воспроизводимость результатов измерений в широком диапазоне давлений;

максимальная проводимость устройства для измерения потока;

минимальное усложнение вакуумной системы;

возможность автоматизации процесса измерения потока и вывода результатов измерений во внешнюю цепь (для записи, использования в цепях управления и других целей).

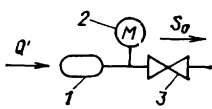
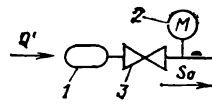
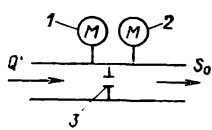
Известные методы измерения потока разреженных газов можно разделить на две группы:

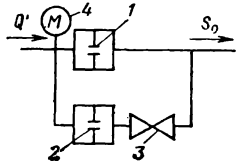
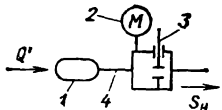
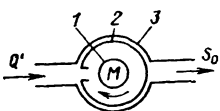
1. *Периодические* измерения, при которых в течение определенного промежутка времени производится усредненный за этот промежуток отсчет потока.

2. *Непрерывные* измерения.

В табл. 12.2 приводятся наиболее распространенные методы измерения потока разреженного газа и их краткая техническая характеристика.

Методы измерения потока разреженного газа

№	Метод измерения	Схема измерения	Основная зависимость	Минимальный измеряемый поток Q' , м³·Па/с	Примечания
1	Метод накопления		$Q' = \frac{\Delta p V}{\Delta t}$	10^{-12}	Периодические измерения потока. Применяется в лабораторной практике и в теческании. Точность измерений зависит от сорбционно-десорбционных явлений в манометрическом преобразователе и в системе накопления газов
2	Метод накопления с анализом динамики изменения давления		$Q' = \left[V_2 \frac{dp}{dt} \right]$	10^{-8}	Периодические измерения потока. Применяется в промышленных установках для АСУ ТП с выводом на ЭВМ. Повышенная точность измерений за счет снижения влияния манометрического преобразователя на результаты измерений
3	Метод калиброванного сопротивления и двух манометрических преобразователей		$Q' = U (p_1 - p_2)$	10^{-8}	Непрерывные измерения потока. Широко применяется в лабораторной практике и в промышленности для измерения быстроты действия насосов, калибровки измерительной аппаратуры и т. п. Точность измерений зависит от сорбционно-десорбционных явлений в системе и манометрических преобразователях и от флуктуаций отсчетов вакуумметров

№	Метод измерения	Схема измерения	Основная зависимость	Минимальный измеряемый ток Q' , м ³ ·Па/с	Примечания
4	Метод двух калиброванных сопротивлений и одного манометрического преобразователя		$Q' = U_0(p_1 - p_2)$	$10^{-6} - 10^{-7}$	Периодические измерения потока. Применяется в некоторых постах откачки ЭВП
5	Метод, использующий насос с высокой быстрой действия		$Q' = U_p$	—	Непрерывные измерения потока. Промышленные посты откачки ЭВП. Необходим контроль за быстрой действия насоса
6	Метод порционного перепуска		$Q' = V(p_1 - p_2) n$	10^{-5}	Непрерывные измерения потока. Применяется в вакуумной метрологии и лабораторной практике. Широкий диапазон работы, т. е. независимость от режима течения газа. Малая проводимость измерителя потока в выключенном положении, что требует применения обходной магистрали

12.2. МЕТОД НАКОПЛЕНИЯ

При измерении потока методом накопления (см. схему 1 табл. 12.2) часть вакуумной системы с источником потока газовой выделения 1 и манометрическим преобразователем отсоединяется краном 3 от насоса на фиксированное время Δt . В отсоединенной части вакуумной системы с известным объемом V (V — суммарный объем источника потока газовой выделения и отсоединенной части вакуумной системы) вследствие газовой выделения Q' давление увеличится на Δp , а количество газа возрастет на $\Delta p V$. Тогда измеряемый поток разреженного газа будет равен:

$$Q' = \frac{\Delta p V}{\Delta t}, \quad (12.3)$$

где $\Delta p = p_2 - p_1$ — прирост давления в отсоединенной части вакуумной системы;

p_1 — давление в отсоединенной части системы, измеренное до перекрытия крана;

p_2 — давление в отсоединенной части системы, установившееся после закрытия крана через время Δt ;

V — суммарный объем отсоединенной части вакуумной системы;

Δt — время накопления, в течение которого часть вакуумной системы была отсоединена от насоса.

Для того, чтобы повысить чувствительность метода, достаточно увеличить время накопления газа. Время накопления газа чаще всего ограничивается допустимым возрастанием давления в изделии или в вакуумной системе при отключении от насоса.

Метод накопления широко распространен и доступен для большинства вакуумных систем, но имеет ряд недостатков, основные из которых следующие:

1. Для измерения потока газа необходимо знать объем обрабатываемого изделия или вакуумной системы (источника потока газовой выделения).

2. Метод нельзя использовать при измерении быстро изменяющихся потоков газа.

3. Сорбционно-десорбционные явления в манометрическом преобразователе сильно влияют на результаты измерения потока.

12.3. МЕТОД НАКОПЛЕНИЯ С АНАЛИЗОМ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Влияние сорбционно-десорбционных явлений в манометрическом преобразователе на результаты измерения потока может быть сведено к минимуму, если измерение производить по схеме 2 табл. 12.2.

Во время откачки камеры 1 — источника потока в вакуумной системе (рис. 12.1) установилось давление p_0 , измеряемое манометрическим преобразовате-

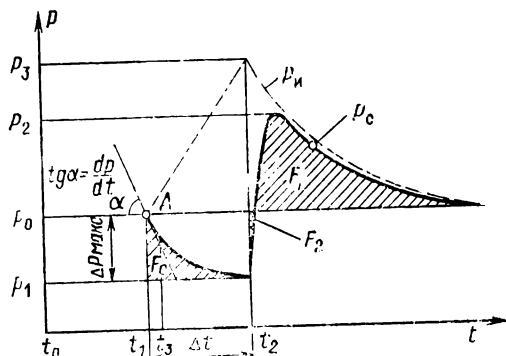


Рис. 12.1. Изменение давления в вакуумной системе в зависимости от времени откачки.

лем 2. На рис. 12.1 показаны графики изменения давления во времени. После закрытия крана 3 на фиксированное время Δt давление в системе со стороны насоса понизится до p_1 вследствие прекращения поступления газа из камеры 1. В это же время в связи с прекращением откачки давление в камере 1 возрастает до p_3 .

При достаточно быстром открытии крана 3 давление в системе вначале возрастет до p_2 , а затем начнет уменьшаться до p_0 . Заметим, что для реализации этого метода необходимы насос с *постоянной* или *маломеняющейся* во время измерения быстротой действия и достаточно *быстродействующий* кран с автоматизированным приводом. Измерение потока газа осуществляется с помощью дифференцирования изменения давления в первый момент после закрытия крана 3.

Нестационарный процесс откачки части вакуумной системы объемом V_2 после закрытия крана описывается

функцией изменения давления во времени

$$p = p_0 e^{-\frac{S_0}{V_2} t} \quad (12.4)$$

где S_0 — эффективная быстрота откачки объема V_2 ;
 V_2 — объем вакуумной системы между насосом и краном 3.

Это экспоненциальное изменение давления можно для t гораздо меньшего V_2/S_0 заменить линейной зависимостью

$$p = p_0 \left(1 - \frac{S_0}{V_2} t \right). \quad (12.5)$$

Ошибка не превысит 10% (для измерения потока разреженного газа такая максимальная дополнительная ошибка вполне допустима), если время измерений (см. рис. 12.1) будет

$$t_2 - t_1 \leq 0,375 \frac{V_2}{S_0}. \quad (12.6)$$

Из уравнения (12.5) найдем, что вблизи точки А

$$\frac{dp}{dt} = - \frac{p_0 S_0}{V_2}. \quad (12.7)$$

Поскольку $p_0 S_0 = Q'$, то

$$Q' = - V_2 \frac{dp}{dt}. \quad (12.8)$$

Более жестким условием правомерности использования этого метода, нежели условие (12.6), является требование к быстродействию крана. Время закрытия крана должно быть по крайней мере на порядок меньше допустимого времени измерения потока, определяемого неравенством (12.6):

$$t_{\text{закр. кр}} \leq 0,04 \frac{V_2}{S_0}. \quad (12.9)$$

В реальных условиях изменение давления с момента закрытия крана описывается плавной кривой уменьшения давления. Максимальное значение производной dp/dt характеризует поток газа.

Основными достоинствами метода являются большая точность измерений, малое время, в течение которого источник потока (например, обрабатываемый электровакуумный прибор) отсоединен от насоса, и легкость автоматизации измерений с помощью ЭВМ.

12.4. МЕТОД КАЛИБРОВАННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ДВУХ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Для измерения потока газа в трубопроводе устанавливают сопротивление (капилляр, диафрагму) 3 с известной проводимостью $U_{отв}$ (схема 3, табл. 12.2). При прохождении газа через диафрагму возникает разность давлений, которая измеряется с помощью манометрических преобразователей 1 и 2, устанавливаемых по обе стороны сопротивления. Поток газа Q' рассчитывается по уравнению

$$Q' = U_{отв}(p_1 - p_2), \quad (12.10)$$

где $U_{отв}$ — проводимость сопротивления 3;

p_1 — давление газа, измеренное перед сопротивлением преобразователем 1;

p_2 — давление газа, измеренное после сопротивления преобразователем 2.

В качестве калиброванного сопротивления часто используют тонкие перегородки, в которых делают несколько отверстий (одно, три, семь). Толщина стенки перегородки должна быть как минимум в 20 раз меньше диаметра отверстия в ней, который в свою очередь должен быть во столько же раз меньше характерного размера трубопровода (диаметра или расстояния между стенками).

В качестве калиброванного сопротивления нередко также используют имеющийся коммутирующий элемент, например вакуумный кран, проводимость которого оценивается экспериментально. В этом случае при калибровке системы вместо обрабатываемого прибора (источника потока) к системе подсоединяют источник регулируемого потока со своим измерителем и определяют взаимосвязь между разностью давлений $p_1 - p_2$ и потоком газа известной величины для разных фиксированных положений крана.

Коррекцию изменения проводимости крана в связи с тем, что состав газов потока из обрабатываемого прибора отличается от потока из источника при градуировке крана, можно провести на основе формулы

$$M_{см} = \frac{p_1 M_1 + p_2 M_2 + \dots + p_n M_n}{P_{общ}}, \quad (12.11)$$

где $M_{см}$ — средняя «эффективная» молекулярная масса смеси;

M_1, M_2, M_n — молекулярные массы компонентов в газовой смеси;

p_1, p_2, p_n — их парциальные давления;

$p_{\text{общ}}$ — сумма парциальных давлений (общее давление).

Метод измерения потока с помощью калиброванного сопротивления нашел широкое распространение в промышленности и лабораторной практике. Метод применяется для измерения потока газа из электровакуумных приборов при их обработке на откачном посту, для измерения быстроты действия вакуумных насосов, проводимости трубопроводов и других вакуумных элементов.

Недостатком метода является то, что для измерения потока газа с достаточной точностью необходимо использовать диафрагму малой проводимости, чтобы создать разность давлений, отличающихся в 3—10 раз. Столь значительная разность давлений приводит к существенному повышению давления в полости обрабатываемого прибора из-за сильного ограничения быстроты его откачки.

Измерение этим методом потоков менее $10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ затруднено из-за сорбционно-десорбционных процессов в манометрических преобразователях и в вакуумной системе.

12.5. МЕТОД ДВУХ КАЛИБРОВАННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ОДНОГО МАНОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

С целью уменьшения ошибок измерения потока, связанных с использованием двух манометрических преобразователей, применяют метод двух калиброванных сопротивлений и одного манометрического преобразователя (схема 4 табл. 12.2). В этом случае для измерения потока газа в основном трубопроводе устанавливают калиброванное сопротивление (диафрагму) 1 и манометрический преобразователь 4, а в ответвленном — калиброванное сопротивление (диафрагму) 2 и кран 3. При измерении потока этим методом необходимо, чтобы быстрота действия насоса во время измерений оставалась постоянной. Ошибка в измерении потока будет минимальна в том случае, если проводимости диафрагм 1 и 2 близки по значению.

Поток газа, протекающий через систему при закрытом и открытом кране 3, равен:

$$\left. \begin{aligned} Q' &= U_1(p_1 - p'_1); \\ Q' &= U(p_2 - p'_2); \end{aligned} \right\} \quad (12.12)$$

здесь U_1 — проводимость диафрагмы 1;

U — результирующая проводимость диафрагмы 1, обводного трубопровода с диафрагмой 2 и краном 3.

Обводной трубопровод и кран делают с проводимостью на два порядка более высокой по сравнению с проводимостью диафрагмы 1 или 2. Тогда

$$U = U_1 + U_2, \quad (12.13)$$

где U_2 — проводимость диафрагмы 2;

p_1, p_2 — отсчеты давлений вакуумметром перед диафрагмой со стороны источника потока при закрытом и открытом кране 3 соответственно;

p'_1, p'_2 — давления с другой стороны диафрагмы.

Давления p'_1 и p'_2 равны, поскольку потоки и быстрота действия насоса в обоих измерениях остаются постоянными. После преобразования, учтя, что $p'_1 = p'_2$, получим:

$$Q' = U_0(p_1 - p_2), \quad (12.14)$$

где U_0 — расчетная проводимость для измерения потока:

$$U_0 = \frac{U_1}{U_2} (U_1 + U_2). \quad (12.15)$$

При $U_1 = U_2$

$$U_0 = 2U_1. \quad (12.16)$$

Измерение потока этим методом можно осуществить и без обводного канала. Для этого в трубопроводе с манометрическим преобразователем устанавливается заслонка, имеющая два или даже три фиксированных положения, характеризующихся проводимостями U_1, U_2 и U_3 .

При определении потока газа дважды измеряют давление при разных положениях заслонки и по формулам (12.14) и (12.15) вычисляют поток газа. Естественно, отсчеты давления делаются после того, как давления в системе после переключения заслонки становятся стабильными во времени.

Третье положение заслонки (соответствующее проводимости U_3) позволяет проверить достоверность измерения потока, т. е. постоянство быстроты действия насоса во время всех измерений.

12.6. МЕТОД, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ НАСОС С ВЫСОКОЙ БЫСТРОТОЙ ДЕЙСТВИЯ

Метод калиброванного сопротивления и двух манометрических преобразователей по схеме 3 табл. 12.2 можно видоизменить при откачке ЭВП насосом с *высокой быстротой действия*. Обычно электровакуумные приборы снабжены откачным штенгелем 4 (см. схему 5 табл. 12.2) с проводимостью менее 1 л/с, а применяемые для их откачки насосы имеют, как правило, быстроту действия не менее 100 л/с. При использовании этого метода между прибором 1 и насосом устанавливают заслонку 3. Перекрытие трубопровода заслонкой производится настолько, что эффективная быстрота откачки S_0 в месте присоединения манометрического преобразователя 2 становится значительно меньше быстроты действия насоса S_n и практически определяется проводимостью U заслонки 3, т. е. $S_0 \approx U$.

Зная предварительно рассчитанное или измеренное значение проводимости U и измеряя установившееся в системе давление p , поток газа можно определить по формуле

$$Q' = pS_0 = pU. \quad (12.17)$$

Общий недостаток методов, использующих калиброванное сопротивление, состоит в том, что *при их применении калиброванное сопротивление остается постоянным только до тех пор, пока течение газа происходит в молекулярном режиме*. В молекулярно-вязкостном и вязкостном режимах течения газа проводимость элементов зависит от среднего давления (см. гл. 18) и оценка потока становится более сложной.

12.7. МЕТОД ПОРЦИОННОГО ПЕРЕПУСКА (ОБЪЕМНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПОТОКА)

Объемные измерители потока широко применяются для измерения расхода газов и жидкостей в технике высоких давлений. Этот метод, обладающий повышенной точностью измерения, используется и в вакуумной

технике. Существенными достоинствами метода являются его применимость в широком диапазоне давлений и независимость показаний от характера течения газа.

Однокамерная конструкция измерителя потока газа с контролем давления по одному манометрическому преобразователю (см. схему 6 табл. 12.2) состоит из корпуса 3, в котором вращается или качается тонкостенная измерительная камера 2 объемом V , выполненная в виде цилиндра со щелью по образующей. В центре камеры 2 установлен манометрический преобразователь открытого типа 1. Внутренняя полость камеры 2 периодически сообщается то с линией источника потока, то с линией откачки. Газ порциями, равными внутреннему объему камеры V , умноженному на разность давлений $p_1 - p_2$, перепускается из линии источника потока в линию откачки. Измеряемый поток газа Q' равен

$$Q' = V(p_1 - p_2)n = Vp_{\sim} n, \quad (12.18)$$

где p_1 — максимальное давление в камере 2 при ее соединении с линией источника потока;

p_2 — минимальное давление в камере 2 при ее соединении с линией откачки;

n — частота вращения (качания) измерительной камеры 2.

При постоянной частоте вращения измерительной камеры поток однозначно определяется переменной составляющей давления $p_{\sim}$. Во время измерения потока этим методом линия источника потока в любой момент времени изолирована измерителем потока от линии откачки. Проводимость системы особенно резко уменьшается при остановке движения измерительной камеры. При этом проводимость определяется размерами зазоров между измерительной камерой и корпусом измерителя потока. Поэтому измеритель потока целесообразно в данном случае шунтировать обводным трубопроводом с краном.

При условии, что газ при движении камеры 2 успевает заполнить ее или выйти из нее и давления между измерительной камерой и соответствующими частями вакуумной системы успевают выровняться, проводимость U измерителя потока определяется выражением

$$U = Vn. \quad (12.19)$$

Очевидно, что с увеличением частоты вращения n измерительной камеры пропорционально увеличивается

проводимость измерителя потока. Однако, когда время одного полупериода становится сопоставимым со временем заполнения измерительной камеры газом, проводимость измерителя потока достигает максимального значения и в дальнейшем не изменяется с увеличением частоты вращения камеры.

Частота вращения камеры должна быть не более

$$n \leq U_K/8V, \quad (12.20)$$

где n — частота вращения (качания) измерительной камеры, с^{-1} ;

U_K — проводимость канала для входа газа в камеру;

V — объем измерительной камеры.

Оптимальная частота вращения $5\text{--}10 \text{ с}^{-1}$. При этом достигаются значительная проводимость системы и высокая чувствительность, а также обеспечивается достаточно большой сигнал переменного ионного тока, поступающий от манометрического преобразователя.

12.8. МЕТОДЫ ДОЗИРОВАНИЯ ПОТОКА ГАЗА

При проведении некоторых технологических операций, испытании вакуумной аппаратуры например, при измерении быстроты действия вакуумных насосов необходимо дозировать поток газа. В зависимости от величины потока применяют разные технические приемы.

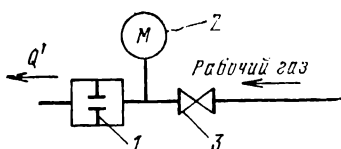


Рис. 12.2. Принципиальная схема системы для дозирования потока менее $10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

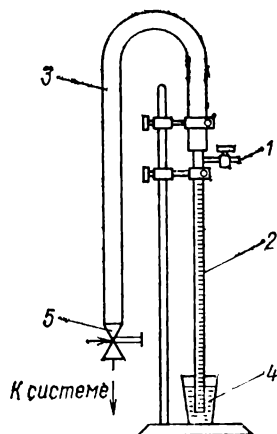
Дозирование потоков менее $10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ осуществляют с помощью калиброванного сопротивления; в диапазоне потоков газа $10^{-4}\text{--}2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ применяют бюретки или пипетки; потоки более $0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ контролируют с помощью ротаметров.

Дозирование потока газа менее $10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Дозирование малых потоков осуществляется по схеме, показанной на рис. 12.2. Необходимый поток Q' задается напекателем 3. Проходя через диафрагму 1, газ создает на ней разность давлений. Проводимость U диафрагмы выбирается такой, чтобы давление газа за ней было на два-три порядка меньше давления p перед диафрагмой, которое измеряется манометрическим преобразователем 2. В этих условиях поток

$$Q' = pU. \quad (12.21)$$

Рис. 12.3. Принципиальная схема для дозирования потока в диапазоне 10^{-4} — $2 \text{ м}^3 \text{ Па/с}$.

1 — стеклянный кран; 2 — бюретка; 3 — шланг; 4 — стакан с вакуумным маслом; 5 — натека-
тель.



Погрешность дозирования в этом случае определяется в основном погрешностью измерения давления p . Наиболее точные измерения давления удается произвести в диапазоне давлений от 10^3 до 10^5 Па . Чтобы обеспечить молекулярный режим течения газа при столь высоких давлениях, необходимо создать сопротивление течению газа с проводимостью примерно 10^{-5} л/с . Такие сопротивления могут быть реализованы путем использования пористых стекол. Пористые стекла механически прочны и могут работать начиная с атмосферного давления, но требуют защиты от паров масел. Перегородки с проводимостью более 10^{-3} л/с могут быть изготовлены из тонкой медной фольги с отверстием, образованным лучом лазера. Такие перегородки допускают работу с парами веществ, но менее прочны, и их можно использовать лишь при давлениях не более 10^2 Па .

Дозирование потоков в диапазоне 10^{-4} — $2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Напуск газа (см. рис. 12.3) в вакуумную систему осуществляется с помощью натекателя 5, соединенного шлангом 3 с верхним концом бюретки 2. К верхнему концу бюретки припаивается также стеклянный кран 1, соединяющий бюретку 2 и натекатель 5 с атмосферой. Нижний конец бюретки погружен в стакан 4 с вакуумным маслом.

С помощью натекателя 5 устанавливают необходимое давление p в вакуумной системе. После закрытия крана 1 масло в бюретке начинает подниматься. По скорости подъема масла в бюретке 2 определяют количество вытесненного из бюретки воздуха $\Delta(pV)$. Поток газа

$$Q' = \frac{\Delta(pV)}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (V_0 \Delta p + p_0 \Delta V + \Delta p \Delta V), \quad (12.22)$$

где Δt — время поднятия столба масла в бюретке;

V_0 — начальный объем бюретки 2 и соединительного шланга 3 до запорного элемента натекателя 5;
 Δp — изменение давления газа в бюретке, равное давлению столба масла, поднявшегося за время Δt ;
 p_6 — барометрическое давление;
 ΔV — изменение объема газа в бюретке, равное объему столба масла, поднявшегося за время Δt ;

$$\Delta V = \frac{V_6}{n} h, \quad (12.23)$$

где V_6 — объем градуированной части бюретки;
 n — число делений градуированной части бюретки;
 h — высота поднятия масла в бюретке за время Δt в делениях градуированной части бюретки;

$$\Delta p = \rho g h l, \quad (12.24)$$

где ρ — плотность масла;
 g — ускорение силы тяжести;
 l — длина одного деления бюретки.

Так как $\Delta p \Delta V$ в уравнении (12.22) мало в сравнении с двумя первыми слагаемыми и им можно пренебречь, то

$$\Delta(pV) \approx V_0 \Delta p + p_6 \Delta V. \quad (12.25)$$

На основании уравнений (12.23) — (12.25) получим

$$Q' = k_6 \frac{h}{\Delta t}, \quad (12.26)$$

где $k_6 = V_0 \rho g l + \frac{p_6 V_6}{n}$ — коэффициент бюретки.

При дозировании потока с использованием бюретки необходимо следить за стабильностью температуры во время измерений. Изменение температуры на 1°C может привести к дополнительной ошибке в несколько десятков процентов.

Дозирование потоков более $0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Потоки газа более $0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ могут быть дозированы с помощью ротаметров, в которых используется сопротивление движению потока газа, создаваемое поплавком, находящимся в вертикальной конической трубе.

ТЕЧЕЙСКИЕ СИСТЕМЫ

13.1. ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

В любой вакуумной системе всегда имеется ряд участков, наименее надежных в отношении герметичности.

Герметичность вакуумной системы — это свойство всех ее элементов и их соединений обеспечивать настолько малое проникновение (натекание) газа через них, чтобы им можно было пренебречь в рабочих условиях.

Обычно натекание газа происходит через места нарушения герметичности, называемые *течами*. При всей тщательности изготовления вакуумных систем в целом невозможно достигнуть полного отсутствия течей. Можно добиться лишь того, чтобы суммарное натекание оставалось в допустимых пределах, но для этого необходимо уметь провести количественную оценку течей.

Для наблюдения за натеканием необходимо, чтобы вакуумная система была снабжена манометрическим преобразователем и краном, которым можно изолировать систему от насоса.

Пусть при открытом кране в системе установится равновесное давление p_1 . Если известно, что данный насос должен создавать предельное остаточное давление $p_{ост}$, то при сравнении фактически достигаемого в вакуумной системе давления p_1 с давлением $p_{ост}$ возможно одно из двух положений:

- 1) $p_1 \approx p_{ост}$;

- 2) $p_1 > p_{ост}$.

В первом случае систему можно считать герметичной или вакуумно-плотной.

Если же $p_1 > p_{ост}$, то это можно объяснить тремя причинами:

- 1) неисправностью вакуумного насоса; ✓
- 2) газовойделением внутри вакуумной системы; ✓
- 3) натеканием в систему атмосферного воздуха. ✓

Чтобы разделить эти три причины, изолируют систему от насоса, закрыв кран; далее, считая момент закрытия крана за начальный, периодически измеряют давление в системе и строят график зависимости $p=f(t)$, подобный тому, который изображен на рис. 13.1.

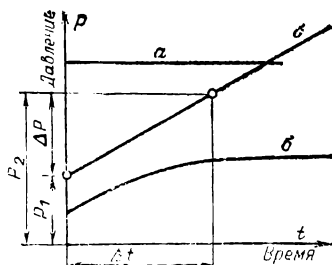


Рис. 13.1. Изменение давления во времени в вакуумной системе после отключения ее от насоса.

а — неисправен вакуумный насос; *б* — газовыделение в системе; *в* — натекание извне в систему.

Если давление p_1 , при котором был закрыт кран, остается практически постоянным в течение достаточно длительного времени (прямая *а*), то это означает, что вакуумная система не может быть откачана из-за неисправности самого насоса.

Если же давление вначале *возрастает* (кривая *б*), а затем, начиная с некоторого момента времени, перестает изменяться, то следует предположить наличие

в системе источника газовой выделения (возрастание давления замедляется по мере приближения к равновесию между выделением и поглощением газа или пара).

Если давление возрастает пропорционально времени (прямая *в*), то причиной этого является *негерметичность*, т. е. наличие течей в вакуумной системе.

Нас интересует именно последний случай. Пусть по истечении времени Δt после закрытия крана давление в системе возросло от p_1 до p_2 . Тогда представление о степени герметичности системы можно получить, если известно, как быстро повышается давление, т. е. каково отношение $\Delta p / \Delta t$ (рис. 13.1). Однако только по скорости изменения давления нельзя дать количественной оценки степени герметичности, так как равные количества газа в системах, имеющих разные объемы, вызовут различное нарастание давления. Поэтому если требуется количественная оценка натекания, то следует принимать во внимание не только скорость возрастания давления в вакуумной системе, но и ее объем V , т. е.

$$Q'_{\text{нат}} = \frac{V \Delta p}{\Delta t}, \quad (13.1)$$

где $Q'_{\text{нат}}$ — натекание или поток газа, приходящий в вакуумную систему (обычно измеряется в единицах потока);

V — объем вакуумной системы;

Δp — изменение давления в системе за время Δt ;

Δt — время, в течение которого система изолирована от насоса.

Таким образом, *натекание, характеризующее герметичность вакуумной системы, определяется произведением объема вакуумной системы на изменение в ней давления газа в единицу времени после прекращения откачки.*

Перейдем теперь к вопросу о *допустимом суммарном натекании*. Для этого рассмотрим два случая, которые являются наиболее характерными.

1. При непрерывной откачке системы с эффективной быстротой откачки S_0 требуется получить давление не больше p_1 . Тогда поток газа

$$Q'_{\text{нат}} \leq S_0 p_1. \quad (13.2)$$

Или в соответствии с (2.9) неравенство (13.2) можно записать в виде

$$Q'_{\text{нат}} \leq \frac{S_n U}{S_n + U} p_1. \quad (13.3)$$

Условие (13.3) показывает, что *суммарное натекание можно считать допустимым, т. е. требуемое давление p_1 в вакуумной системе будет обеспечено и при наличии натекания, если соответствующим образом подобраны быстрота действия насоса S_n и проводимость вакуумного трубопровода U .*

2. В изолированной системе объемом V , находящейся под вакуумом или под избыточным давлением, изменение давления за счет негерметичности не должно превышать Δp в течение времени Δt ; натекание, следовательно,

$$Q'_{\text{нат}} < \frac{V \Delta p}{\Delta t}. \quad (13.4)$$

13.2. МЕТОДЫ ТЕЧЕИСКАНИЯ

Все узлы и приборы, используемые в вакуумной системе, перед сборкой необходимо проверить на герметичность, что предотвращает непроизводительные затраты времени и средств для отыскания мест натекания (течей) в уже собранной системе. Если все же суммарное натекание в собранной вакуумной системе превышает допустимое, то необходимо отыскать течи и устранить их.

Следует отметить, что, помимо *истинных течей*, которые являются местом входа в систему атмосферного

Основные методы течеискания

Наименование метода	Описание метода	Минимальная определяемая течь, м ³ ·Па/с	Применение
Опрессовка	Метод обнаружения течи, при котором с одной стороны испытываемого элемента создается давление пробного вещества, превышающее атмосферное	$1 \cdot 10^{-6}$	Предварительные испытания на герметичность металлических приборов и узлов
Люминесцентный	Метод обнаружения течи, основанный на способности люминесцирующих веществ, проникающих через течь, светиться под действием ультрафиолетового облучения	$10^{-8} - 10^{-9}$	Применяется для испытания герметичности малогабаритных открытых объектов, откачка или опрессовка которых затруднена
Искровой	Применяется течеискатель, действие которого основано на проникновении маломощного искрового разряда внутрь откачиваемого стеклянного сосуда через течь	$1 \cdot 10^{-4}$	Применяется для поиска течей в стеклянных вакуумных системах
Манометрический	Применяется течеискатель, действие которого основано на изменении выходного сигнала манометрического преобразователя при проникновении пробного вещества через течь	$10^{-6} - 10^{-7}$	Применяется для поиска негерметичных мест в вакуумных системах без количественной оценки течей
Галогенный	Применяется течеискатель, действие которого основано на изменении эмиссии ионов нагретой металлической поверхности при попадании на нее пробного вещества, содержащего галогены	$10^{-8} - 10^{-9}$	Применяется для поиска негерметичных мест в больших объемах или в системах с разветвленными трубопроводами
Масс-спектрометрический	Применяется течеискатель, действие которого основано на принципе разделения ионов разных газов по массам	$6 \cdot 10^{-14} - 1 \cdot 10^{-17}$	Широко применяется для поиска весьма малых течей в вакуумных системах и электровакуумных приборах

воздуха, могут существовать и так называемые *кажущиеся течи*. Такие течи возникают чаще всего в неправильно сконструированных сварных или паяных соединениях, в которых имеются воздушные карманы.

Приборы, служащие для обнаружения мест течи, получили название *течеискателей*.

Течеискатели избирательно реагируют на отдельные физико-химические свойства газов, с помощью которых определяется место течи. Эти газы мы назовем *пробными веществами*. Пробное вещество, проходя через течь, попадает в датчик течеискателя и создает сигнал, по величине которого судят о размерах течи. Основным параметром течеискателя является его *чувствительность*, которая характеризуется *либо минимальным потоком пробного вещества, определяемого прибором, либо концентрацией пробного вещества в атмосфере, которую способен уловить течеискатель*.

В табл. 13.1 приведены основные методы течеискания, получившие распространение в лабораторной практике и в промышленности.

13.3. МЕТОД ОПРЕССОВКИ

Метод опрессовки заключается в создании внутри испытуемого сосуда давления, превышающего атмосферное, и применении того или иного внешнего указателя места течи.

Этот метод, как правило, к полностью собранной вакуумной системе неприменим, так как в большинстве случаев не все узлы последней могут выдержать повышенное давление. В то же время метод очень удобен для предварительных испытаний на герметичность металлческих приборов и узлов.

Давление внутри испытуемого сосуда можно создавать при помощи газообразных веществ. Для обнаружения места течи могут служить различные явления, связанные с выходом сжатого газа из мест натекания. Так, если внутри сосуда создано повышенное давление воздуха или азота, то в качестве указателя может служить задувание или колыхание пламени какой-либо горелки, поднесенной к негерметичному месту, или даже звук (шипение) выходящего газа. Однако таким путем можно обнаружить лишь весьма грубые течи, величина которых больше $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Значительно более тонкие течи можно отыскивать, применяя в качестве указателя мыльную пленку. Мыльная пленка, попав на место течи, легко образует пузыри, регулярное появление которых указывает на место нарушения герметичности.

Несколько менее чувствительным является наблюдение за образованием пузырей в воде, в которую погружен испытуемый сосуд. На месте грубой течи появляется целая цепочка всплывающих вверх пузырей; при более тонкой течи отдельные пузыри могут появляться лишь периодически.

13.4. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД

Люминесцентный метод в отличие от большинства других методов связан с непосредственным обнаружением жидкого пробного вещества и широко применяется для испытания на герметичность малогабаритных открытых сосудов, откачка или опрессовка которых затруднена или просто невозможна.

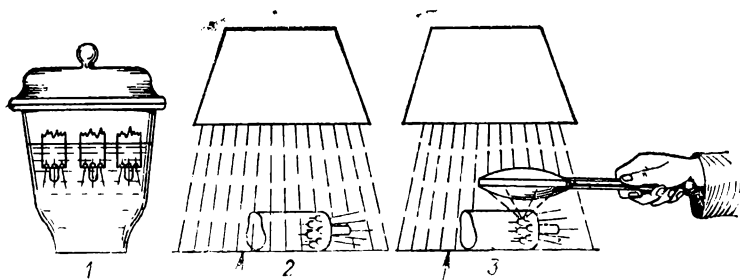


Рис. 13.2. Обнаружение мест течи люминесцентным методом. 1 — образцы, погруженные в жидкий раствор; 2 — образец, облучаемый ультрафиолетовыми лучами; 3 — фокусировка ультрафиолетовых лучей лу-пой.

Испытуемый на герметичность сосуд (рис. 13.2) целиком или только подозрительной по натеканию частью помещается в раствор люминофора в органической жидкости (трихлорэтилене или четыреххлористом углероде) так, чтобы он не попал во внутреннюю полость или на противоположную поверхность стенки, которые по окончании выдержки обследуют в ультрафиолетовых лучах.

Если в погруженном сосуде имеется течь, то под действием капиллярных сил между стенками течи и раствором последний втягивается внутрь течи и рано

или поздно проходит по всей длине на противоположную сторону течи, где по мере испарения растворителя накапливается подсохший люминофор.

При облучении испытуемого сосуда ультрафиолетовыми лучами светящийся люминофор укажет место нахождения течи.

Источником ультрафиолетовых лучей служит обычная кварцевая лампа. Как уже отмечалось, главной положительной особенностью этого метода является отсутствие надобности в откачке испытуемых сосудов, благодаря чему люминесцентный метод среди других методов течеискания, в том числе и самых чувствительных, часто оказывается единственно применимым. Достоинством метода является также его относительно высокая чувствительность, которая ограничивается лишь допустимой для данного случая длительностью выдержки испытуемого сосуда в растворе до появления свечения.

Теоретически можно подсчитать, что если испытуемый сосуд выдержать в течение 1—2 ч, то можно обнаружить течи порядка $10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, а после выдержки 1—2 сут — порядка $10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Однако следует обратить внимание на то, что люминофоры отравляют окисные катоды, что делает невозможным применение люминесцентного метода для испытаний большинства электровакуумных приборов, содержащих подобные широко распространенные катоды.

13.5. ИСКРОВОЙ ТЕЧЕИСКАТЕЛЬ

В искровом течеискателе используется высокочастотный разряд, получаемый с помощью трансформатора Тесла.

При прикосновении щупа, соединенного со вторичной обмоткой трансформатора, к стеклянной стенке вакуумной системы, давление в которой находится в пределах 5,0— 10^2 Па, возбуждается высокочастотный разряд. Если после возбуждения разряда щуп (рис. 13.3) держать достаточно близко от какого-либо участка поверхности, то при отсутствии течи в этом участке на конце щупа будет виден пучок искр, направление которых не связано с какими-либо фиксированными точками на поверхности стекла *a*.

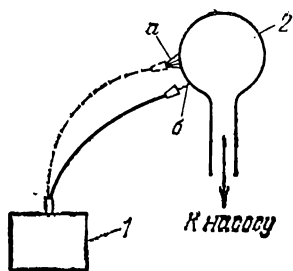


Рис. 13.3. Обнаружение места течи искровым течеискателем.

1 — искровой течеискатель; 2 — обследуемый сосуд.

Если же шуп окажется над участком, где имеется течь, то наряду с ненаправленным пучком искр в дефектное место будет бить искра, отличающаяся от остальных значительно большей яркостью и точно указывающая место течи б.

Обрабатывать длительное время герметичные стеклянные поверхности искровым разрядом течеискателя не рекомендуется, так как искра в тонких местах может пробить стекло и образовать течь.

Определение течи искровым течеискателем вблизи металлических деталей системы затруднено, так как весь искровой разряд попадает на металл.

13.6. МАНОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Метод теплового манометрического преобразователя. Тепловой манометрический преобразователь обычной конструкции можно применить для поиска течи. Для этого между манометрическим преобразователем и вакуумной системой должна быть достаточная проводимость, чтобы при воздействии на негерметичное место пробным веществом последнее легко проникало в достаточном количестве и быстро заменяло воздух в объеме преобразователя.

В качестве пробного вещества выбирают такие пары или газы, которые по сравнению с воздухом обладают или значительно большей, или значительно меньшей *теплопроводностью*. Пока течь не обнаружена, показания прибора в измерительном блоке преобразователя не изменяются.

Если в качестве пробного вещества использовать, например, водород, обладающий, как известно, большой теплопроводностью, то при его попадании в манометрический преобразователь через места течи в вакуумной системе температура нити понизится и стрелка измерительного прибора отклонится влево (указывая как бы на повышение давления).

Очевидно, методом теплового манометрического преобразователя можно пользоваться, если в системе поддерживается давление, не выходящее за пределы рабочего диапазона этого преобразователя.

Следует заметить, что на показания измерительного прибора влияет не только проникновение пробного вещества, но и изменение давления воздуха в манометрическом преобразователе. Поэтому при поисках мест течи давление необходимо поддерживать на достигнутом уровне путем непрерывной откачки вакуумной системы.

С помощью теплового манометрического преобразователя можно обнаружить наименьшую течь, равную $10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Метод высоковакуумного манометрического преобразователя. Если вакуумная система может быть откачана до давления порядка $5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ или ниже и обнаруживает признаки негерметичности, то течь можно найти с помощью какого-либо высоковакуумного манометрического преобразователя, например, использовав для этого электронный ионизационный вакуумметр.

В качестве пробного вещества применяют такие пары или газы, которые, попадая в манометрический преобразователь через течь в вакуумной системе, изменяют ионный ток. Ионный ток будет возрастать, если применить пары ацетона, эфира и т. п., так как последние, попадая в манометрический преобразователь, разлагаются при соприкосновении с накалимым катодом, отчего увеличивается количество молекул и, следовательно, ионов. Если же в качестве пробного вещества взять гелий или неон, то ввиду более низкой чувствительности электронного ионизационного преобразователя по этим газам по сравнению с воздухом количество ионов, образующихся в манометрическом преобразователе, уменьшится и измерительный прибор покажет меньший ионный ток. Метод высоковакуумного манометрического преобразователя позволяет обнаруживать наименьшую течь, равную $10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

13.7. ГАЛОГЕННЫЙ ТЕЧЕИСКАТЕЛЬ

В галогенных течеискателях используется эффект резкого возрастания эмиссии положительных ионов с накалиной до $1000\text{—}1200 \text{ К}$ платины при попадании в датчик работающего прибора галлоидсодержащих газов. В качестве таких газов применяют чаще всего

хладон. Явление возрастания эмиссии в галогенных теческателях наблюдается при работе прибора как при атмосферном давлении, так и в вакууме.

В качестве датчика теческателя применяют диод, схематически изображенный на рис. 13.4. Анодом, эмитирующим положительные ионы, служит платиновый цилиндр 1, нагреваемый платиновым подогревателем 2.

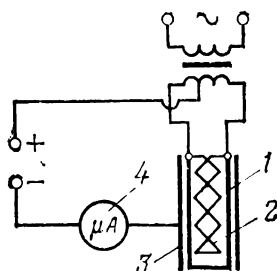


Рис. 13.4. Принципиальное устройство датчика галогенного теческателя.

1 — цилиндрический анод; 2 — платиновый подогреватель; 3 — цилиндрический коллектор ионов; 4 — измерительный прибор.

С положительным полюсом источника постоянного тока анод связан через вторичную обмотку трансформатора накала. К отрицательному полюсу того же источника присоединен цилиндрический коллектор ионов 3, изготовленный из нержавеющей стали и расположенный вокруг цилиндра 1. Ионный ток анода регистрируется микроамперметром 4.

Обнаружение течей галогенным теческателем может производиться как методом *опрессовки*, когда обследуемый сосуд заполняется хладоном или смесью хладона с воздухом до избыточного давления, так и методом *обдувания* хладоном, когда в обследуемом сосуде поддерживается разрежение.

При работе по методу опрессовки используется атмосферный шуп 2 (рис. 13.5). В передней части шупа прикреплен наконечник с пазодкой, направляемой к месту возможной течи; позади датчика в шуп вставлен миниатюрный вентиль, предназначенный для продувания воздуха через датчик.

Чувствительность метода сильно зависит от избыточного давления опрессовки. При работе с чистым хладоном максимальную чувствительность лимитирует давление насыщенного пара над жидким хладоном, которое при 298 К равно $6,6 \cdot 10^5$ Па. При таком давлении опрессовки может быть обнаружена течь 10^{-9} м³·Па/с.

При испытаниях смесью воздуха с хладоном чувствительность метода, с одной стороны, снижается за счет уменьшения доли хладона в потоке через течь, но, с другой стороны, чувствительность может быть существенно увеличена за счет применения больших давлений опрессовки.

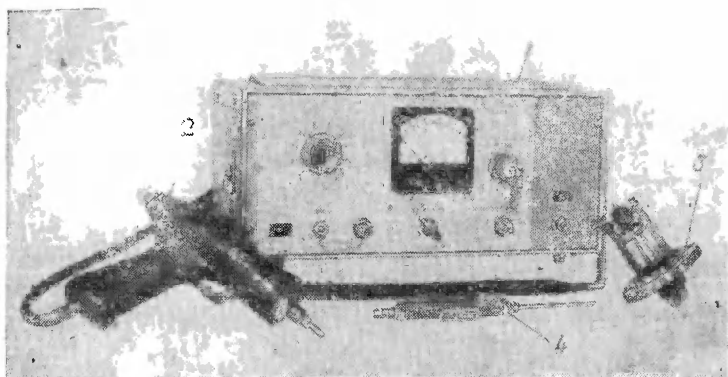


Рис. 13.5. Галогенный теческатель.

1 — измерительный блок; 2 — щуп с атмосферным датчиком; 3 — вакуумный датчик; 4 — обдуватель.

совки без конденсации хладона. Чувствительность метода опрессовки может быть оценена по формуле

$$Q'_{\text{нат. мин}} \approx \frac{3,2 \cdot 10^{-7}}{c \left(\frac{p_{\text{опр}}^2}{p_{\text{б}}^2} - 1 \right)}, \quad (13.5)$$

где $Q'_{\text{нат. мин}}$ — минимально обнаруживаемая течь, $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$;

c — объемная концентрация хладона в смеси, заполняющей сосуд;

$p_{\text{опр}}$ — давление опрессовки;

$p_{\text{б}}$ — барометрическое давление.

Пример 13.1. Испытуемый сосуд заполнен смесью хладона с воздухом с концентрацией фреона 0,5. Чему равна минимально определяемая течь, если давление смеси составляет $3 \cdot 10^5$ Па.

По формуле (13.5) найдем:

$$Q'_{\text{нат. мин}} = \frac{3,2 \cdot 10^{-7}}{0,5 (9 - 1)} \approx 8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}.$$

Для работы по методу обдува используют вакуумный датчик 3 (рис. 13.5), который встраивают в вакуумную систему откачки испытуемого сосуда. При обследовании небольших сосудов датчик целесообразно устанавливать между сосудом и вакуумным насосом: при откачке сосуда пароструйным насосом большой производительности датчик течейскаателя лучше всего расположить на выпускной стороне насоса. Следует указать, что для поддержания чувствительности течейскаателя на заданном уровне необходимо присутствие кислорода. Поэтому при работе с вакуумным датчиком необходимо поддерживать давление в нем около 1 Па. Иногда это делается с помощью искусственного натекания. Во всех случаях между обследуемым сосудом и датчиком не должно быть ловушек с жидким азотом, так как в них будет конденсироваться хладон.

При работе с галогенными течейскаателями необходимо всячески избегать выпуска пробного вещества непосредственно в помещение. Попадание большого количества галоидсодержащего газа в датчик течейскаателя приводит к резкому снижению термоионной эмиссии вследствие отравления датчика. Для восстановления эмиссионных свойств прибора необходимо в рабочем режиме пропустить через него кислород или воздух, свободный от галоидсодержащих соединений.

После длительной работы течейскаателя наступает своего рода старение, заключающееся в плавном снижении ионного тока. Для проверки чувствительности течейскаателя обычно применяют калиброванную течь, обеспечивающую определенный поток галоидсодержащего газа.

13.8. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ТЕЧЕЙСКАТЕЛЬ

В основу принципа работы течейскаателя этого типа положен масс-спектрометрический метод (см. § 11.3) обнаружения вещества в испытываемом сосуде.

В качестве пробного вещества могут быть применены водород, аргон или гелий. Однако чаще всего в масс-спектрометрических течейскаателях используют гелий. Благодаря малому содержанию гелия в атмосферном воздухе (всего 1/200 000 часть) и в газах, выделяемых внутренними стенками вакуумной системы, фон, на котором регистрируют сигнал, невелик, что обеспечивает высокую чувствительность течейскаателя.

Малая молекулярная масса гелия (массовое число 4) позволяет не только создать малогабаритную и простую конструкцию масс-спектрометрической камеры течеискателя, но и обеспечивает эффективное проникновение пробного вещества через течи.

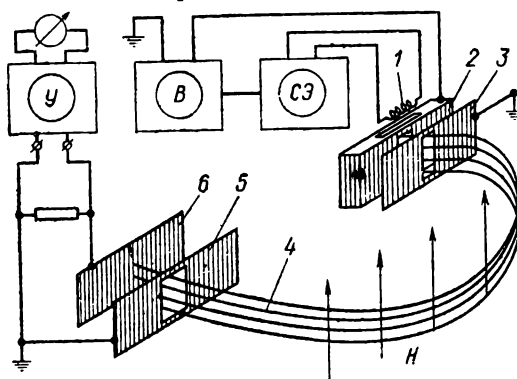


Рис. 13.6. Схема масс-спектрометрического течеискателя.

1 — катод; 2 — коробка ионизатора; 3 — входная диафрагма; 4 — ионный луч; 5 — выходная диафрагма; 6 — коллектор ионов; Н — направление магнитного поля; СЭ — стабилизатор эмиссии катода; В — выпрямитель (разгоняющее напряжение); У — усилитель ионного тока с измерительным прибором.

К этому следует добавить, что гелий, будучи химически инертным газом, совершенно безвреден и безопасен в работе.

Течеискатель состоит из трех основных частей: *анализатора* (масс-спектрометрической камеры с магни-

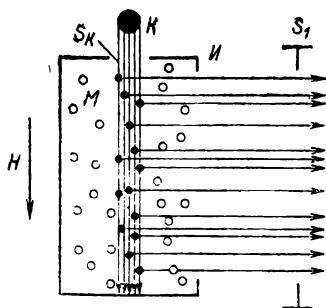


Рис. 13.7. Принцип действия ионного источника.

К — катод; И — коробка ионизатора; S₁ — входная диафрагма; Н — направление магнитного поля; S_к — входная щель для электронов, эмиттируемых катодом.



Рис. 13.8. Схема отклонения ионов различных масс в поперечном магнитном поле.

И — коробка ионизатора; S₁ — входная диафрагма; S₂ — выходная щель; К — коллектор ионов; M₁, M₂, M₃ — ионные пучки с различными массовыми числами.

том), вакуумной системы и электрических блоков питания и измерения. В анализаторе смонтированы ионный источник, приемник ионов и входная и выходная диафрагмы (рис. 13.6). Ионный источник (рис. 13.7) состоит из накаливаемого катода K , коробки ионизатора I и входной диафрагмы S_1 . Приемник ионов состоит из коллектора K и выходной щели S_2 (рис. 13.8).

В источнике ионов накаливаемый вольфрамовый катод эмиттирует электроны, которые фокусируются магнитным полем с индукцией B и ускоряются электрическим полем, приложенным между катодом и коробкой ионизатора.

Течеискатель своей вакуумной частью присоединяется к испытываемому сосуду, который снаружи обдувается гелием. Молекулы гелия, проникая через негерметичные места испытываемого сосуда, поступают в анализатор и, следовательно, в коробку ионизатора ионного источника. В коробке ионизатора молекулы газа, в том числе и гелия, подвергаются ионизации потоком электронов (рис. 13.7). Образующиеся ионы вытягиваются из ионизатора, фокусируются в пучок и ускоряются в область анализатора с помощью системы электрических линз. Для анализа газов по массам применен анализатор с 180 градусной фокусировкой ионного луча полем постоянного магнита (рис. 13.8).

Попавшие в анализатор ионы с некоторой постоянной энергией двигаются под действием лоренцевой силы в однородном поперечном магнитном поле анализатора, свободном от электрических полей. В этом случае радиусы r окружностей, по которым перемещаются ионы, могут быть определены из уравнения

$$r = \frac{1,47 \cdot 10^{-4}}{B} \sqrt{MU}, \quad (13.6)$$

где B — индукция магнитного поля;

U — ускоряющее напряжение, приложенное между коробкой ионизатора и диафрагмой S_1 ;

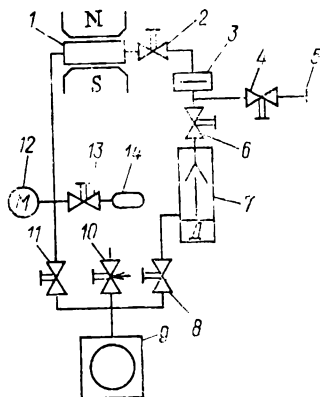
M — массовое число.

Из анализа формулы (13.6) видно, что при постоянных значениях B и U радиус траектории зависит от массового числа M .

Таким образом, в магнитном поле происходит разделение ионного луча на ряд отдельных лучей с одинаковым значением массового числа.

Рис. 13.9. Принципиальная схема вакуумной системы масс-спектрометрического течеискателя.

1 — масс-спектрометрическая камера с магнитами (анализатор); 2, 6, 8, 10, 11, 13 — краны; 3 — азотная ловушка; 4 — дросселирующий край; 5 — присоединительный фланец; 7 — высоковакуумный насос; 9 — насос предварительного разрежения; 12 — манометрический преобразователь; 14 — калибровая течь.



Подобрав ускоряющее напряжение U , можно достичь того, что на коллектор ионов, расположенный в анализаторе, под углом 180° , к ионному источнику будут попадать только ионы гелия. Чтобы одновременно с ионами гелия на коллектор не попадали ионы других масс, случайно попавшие на рабочую траекторию, перед коллектором помещают супрессор — подавитель фона. На супрессор подается потенциал, тормозящий пролетающие ионы. Только ионы, обладающие достаточной энергией, будут в состоянии преодолеть это тормозящее поле и попадут на коллектор. Коллектор ионов 6 соединен с усилителем тока U (см. рис. 13.6). Усиленный сигнал регистрируется стрелочным прибором. Принципиальная вакуумная схема течеискателя показана на рис. 13.9.

Масс-спектрометрическая камера 1 предварительно откачивается через кран 11 механическим вакуумным насосом 9. Высоковакуумная откачка камеры до давления 10^{-3} — 10^{-4} Па производится через кран 2, азотную ловушку 3, кран 6 пароструйным диффузионным насосом 7, выпускной патрубок которого через кран 8 соединен с насосом 9.

Для проверки чувствительности течеискателя предусмотрена калиброванная гелиевая течь 14, которая подсоединяется к вакуумной системе через кран 13. Кран 10 служит для напуска газа в систему при выключении насоса 9 или вскрытии камеры 1.

Чувствительность испытаний может быть еще больше увеличена, если применить метод дросселирования откачки. Для этой цели предусмотрен кран 6, который позволяет изменять проходное сечение на входе насоса 7 и тем самым регулировать быстроту откачки гелия

из масс-спектрометрической камеры 1, а следовательно, и чувствительность течеискателя к гелию. Этот метод дает возможность провести предварительные испытания обследуемого сосуда при малой инерционности прибора, а затем путем частичного закрытия крана 6 осуществить быстрый переход к режиму высокочувствительных испытаний.

Предельно высокая чувствительность к натеканиям порядка 10^{-14} м³·Па/с может быть получена при работе по *методу накопления* пробного вещества в испытываемом сосуде, изолированном от откачки. Для этого испытываемый сосуд или его часть накрывают герметичным мешком, в который напускают гелий. Затем подсоединенный к течеискателю сосуд откачивается и изолируется краном 4 (рис. 13.9) от вакуумной системы течеискателя.

После окончания времени накопления $t_{\text{нак}}$ вновь соединяют сосуд с вакуумной системой течеискателя. При этом в момент соединения в результате накопления в сосуде устанавливается парциальное давление гелия

$$p = \frac{Q'_{\text{нат}} t_{\text{нак}}}{V}, \quad (13.7)$$

где $Q'_{\text{нат}}$ — суммарный поток гелия через все течи испытываемого сосуда;

V — объем испытываемого сосуда;

$t_{\text{нак}}$ — время накопления гелия.

Тогда через течеискатель при его соединении с испытываемым сосудом потечет поток гелия $Q'_{\text{г}}$:

$$Q'_{\text{г}} = p S_0 = \frac{Q'_{\text{нат}} t_{\text{нак}}}{V} S_0, \quad (13.8)$$

где S_0 — эффективная быстрота откачки испытываемого сосуда вакуумной системой течеискателя.

Чувствительность течеискателя к минимальному потоку $Q'_{\text{мин}}$ определяет длительность и режим методики накопления. Поэтому время накопления

$$t_{\text{нак}} \geq \frac{Q'_{\text{мин}} V}{Q'_{\text{нат}} S_0}. \quad (13.9)$$

Часто при испытаниях сосудов с большим газовыделением применение описанной методики накопления

ограничивается из-за общего увеличения давления в процессе накопления. Для исключения этого явления во время накопления масс-спектрометрическая камера, соединенная с испытываемым сосудом, непрерывно откачивается адсорбционным насосом, который, обладая избирательной откачкой газов, позволяет поддерживать достаточно низкое давление в сосуде и масс-спектрометрической камере при незначительной откачке гелия.

ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

Глава четырнадцатая

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

14.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

С принципами построения вакуумных систем мы познакомимся главным образом на основе рассмотрения вакуумных систем оборудования для откачки электровакуумных приборов и вакуумных установок для нанесения тонких пленок.

Оборудование для откачки ЭВП

Технологическое оборудование для откачки и обезгаживания электровакуумных приборов может быть разделено на следующие две группы: *индивидуальные откачные посты и карусельные или конвейерные многопозиционные машины.*

Индивидуальные откачные посты применяются в мелкосерийном и единичном производстве ЭВП, когда изготовление их ведется по отдельным заказам, которые в дальнейшем не повторяются или могут быть возобновлены через неопределенное время.

В крупносерийном и массовом производстве откачка обычно ведется на карусельных или конвейерных многопозиционных машинах, так как это позволяет увеличивать производительность труда по сравнению с откачкой на индивидуальных постах.

Компоновка откачных позиций в конвейерные или карусельные машины с перемещающимися откачными гнездами позволяет исключить дублирование отдельных механизмов, время работы которых по сравнению со временем откачки и обезгаживания прибора невелико (механизмы отпайки и удаления штенгеля, проверки герметичности и т. п.).

Наряду с этим облегчается построение поточных линий, состоящих из отдельных машин, потому что в конвейерных и карусельных машинах съём обработанного изделия и установка нового производится, как правило, в одном месте.

Вакуумные системы современного оборудования для откачки ЭВП, как правило, состоят из следующих основных узлов: откачного гнезда, защитного колпака, коммутирующих элементов, средств откачки и измерения полного или парциального давлений.

Откачное гнездо предназначено для соединения электровакуумного прибора с вакуумной системой оборудования путем напайки стеклянного штенгеля или уплотнения через резиновый или металлический уплотнитель.

Защитный колпак служит для создания вокруг обрабатываемого изделия разрежения, что уменьшает скорость диффузии газа извне в полость прибора, а также исключает окисление внешних поверхностей изделия во время обезгаживания и откачки при повышенных температурах.

Коммутирующие элементы, включающие краны, затворы, клапаны, натекатели, трубопроводы, предназначены для соединения отдельных частей вакуумной системы со средствами откачки и выбираются в соответствии с требованиями по предельному давлению в вакуумной системе и в зависимости от степени автоматизации откачного оборудования.

Средства откачки служат для создания рабочего давления в вакуумной системе и выбираются также в зависимости от необходимого предельного давления и потока газа, поступающего в вакуумную систему из откачиваемого сосуда.

Средства измерения давления служат для контроля технологического процесса и работы вакуумной системы и выбираются в зависимости от диапазона рабочих давлений.

Оборудование для нанесения тонких пленок

Вакуумное оборудование для нанесения тонких пленок так же, как оборудование для откачки ЭВП, может быть разделено на следующие группы: вакуумные установки периодического действия; вакуумные установки непрерывного действия и конвейерные линии непрерывного действия.

Установки периодического действия колпакового типа наиболее распространены в промышленности. Однако контактирование довольно сложного подколпачного устройства установки с атмосферным воздухом после подъема колпака, а также невозможность прогрева колпака затрудняют получение давления меньше $1 \cdot 10^{-4}$ Па. Производительность таких установок также невелика из-за значительного вспомогательного времени, необходимого для получения рабочего давления.

Стремление повысить производительность оборудования, а также обеспечить одинаковые условия для изготовления изделий привело к созданию автоматизированных установок *непрерывного действия* с шлюзовой загрузкой. Непрерывная подача изделий в рабочую камеру устраняет необходимость в остановке работы вакуумной системы и сообщении рабочей камеры с атмосферным воздухом при переходе от одной партии изделий к другой.

Благодаря этому резко сокращается вспомогательное время, обеспечивается однородность технологического процесса и повышается производительность труда.

Вакуумные системы современных установок для нанесения тонких пленок состоят из следующих основных узлов: вакуумной рабочей камеры, коммутирующих элементов, средств откачки и средств измерения давления.

14.2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ВАКУУМНЫМ СИСТЕМАМ

В зависимости от назначения технологической установки к ее вакуумной системе может быть предъявлен ряд требований, выполнение которых обеспечивает возможность проведения необходимого технологического процесса, осуществляемого в вакууме.

1. Вакуумная система должна обеспечить получение требуемого давления в откачиваемом сосуде. Так, установка, предназначенная для откачки ЭВП, должна иметь вакуумную систему, обеспечивающую получение и поддержание давления в приборе на таком уровне, который исключает отравление катода и загрязнение других элементов прибора при достаточно быстром его обезгаживании прогревом. Для удовлетворения этого

требования вакуумная система должна быть герметичной и снабжена соответствующими средствами откачки, измерения давления, коммутирующими и разъемными элементами.

Важным условием выполнения этого требования является подбор материалов, из которых будут изготовлены вакуумная система и ее элементы, а также методы подготовки вакуумной системы к работе.

2. Вакуумная система должна обеспечить возможность получения требуемой скорости откачки сосуда. Для этого вакуумная система должна иметь определенную проводимость, а примененный вакуумный насос должен обладать необходимой скоростью действия.

3. Вакуумная система должна быть снабжена устройствами для контроля ряда параметров, характеризующих ее состояние.

К таким основным параметрам относятся общее и парциальные давления остаточных газов, скорость собственного газовыделения вакуумной системы, скорость накопления отдельных газов и паров в вакуумной системе и т. д.

Для контроля и измерения этих параметров вакуумную систему снабжают преобразователями давления, масс-спектрометрами, потокомерами и другими измерительными приборами.

4. При применении автоматических систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) вакуумная система должна быть оснащена набором различных датчиков, осуществляющих передачу информации на ЭВМ. Используемые в вакуумной системе коммутирующие элементы должны быть автоматизированными, а средства откачки — высокопроизводительными и долговечными.

5. Технологический процесс, осуществляемый на вакуумных установках, часто длится многие десятки часов, поэтому вакуумная система должна быть высоконадежной при эксплуатации и иметь длительный межремонтный период. Это требование вызвано также и тем, что необходимо поддерживать вакуумную систему в рабочем состоянии в течение как можно большего времени. Вакуумная система, длительно не соприкасающаяся с атмосферой (особенно это относится к высоковакуумным магистралям), с течением времени обезгаживается, снижается ее собственное газовыделение и повышается эффективность ее работы.

Рассмотрим принципы построения вакуумных систем на примере технологического оборудования для изготовления электронных приборов, включающего практически все типовые элементы.

14.3. НЕПРОГРЕВАЕМЫЕ ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ ОТКАЧНЫХ ПОСТОВ

В табл. 14.1 приведены принципиальные схемы непрогреваемых вакуумных систем, нашедшие применение в постах откачки ЭВП, работающих в диапазоне давлений от 10^{-2} до $5 \cdot 10^{-5}$ Па.

Прямоточная вакуумная система, построенная по схеме 1 табл. 14.1, проста и широко применяется в лабораторных условиях и в производстве. Вакуумная система состоит из пароструйного диффузионного насоса 1 с маслоотражателем 4 и механического вакуумного насоса 2. Измерение давления производится манометрическими преобразователями 3. Маслоотражатель 4 и присоединительный штенгель чаще всего изготавливаются из стекла. Отпайваются изделия пламенем газовой горелки в месте сужения откачного штенгеля (перетяжке). В системе отсутствуют какие бы то ни было краны, и в случае внезапного обесточивания системы (или выхода из строя насоса 2) неизбежна порча обрабатываемого изделия. К недостаткам системы следует также отнести неизбежность контакта рабочей жидкости насоса 1 с атмосферой при установке изделия.

Вакуумная система, построенная по схеме 2 табл. 14.1, отличается от предыдущей наличием высоковакуумного затвора или крана 5, линии предварительной откачки с краном 10, форвакуумного баллона 3 и электромагнитного клапана аварийного закрытия 9. Высоковакуумный затвор 5 изолирует вакуумную систему от контакта с атмосферой во время установки нового изделия. Применение линии предварительной откачки с краном 10 исключает непроизводительные потери времени на охлаждение и разогрев вакуумного насоса. При откачке воздуха из прибора через линию предварительного разрежения пароструйный диффузионный насос 1 с маслоотражателем 4 работает на форвакуумный баллон 3, который отделен в это время от механического вакуумного насоса 2 электромагнитным клапаном 9. Клапан 9 выполняет также роль защитного устройства, предотвра-

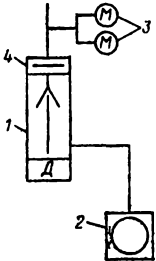
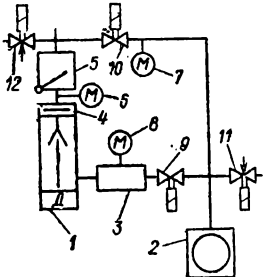
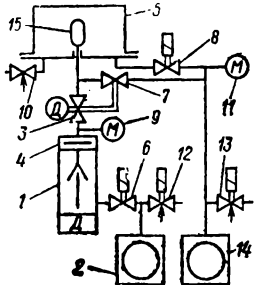
щающего прорыв атмосферы и попадание масла из механического вакуумного насоса при обесточивании или остановке насоса 2. С целью исключения попадания масла из насоса 2 в клапан 9 и кран 10 предусмотрен электромагнитный клапан-натекатель 11, с помощью которого при выключении вакуумной системы пространство над входным патрубком механического вакуумного насоса сообщается с атмосферой. Измерение давления в разных участках вакуумной системы производится манометрическими преобразователями 6, 7 и 8.

Для обработки газонаполненных приборов в вакуумной системе может быть установлен натекатель 12, с помощью которого полость откачиваемого изделия заполняется газом.

Вакуумная система, построенная по схеме 3 табл. 14.1, нашла широкое применение в установках для откачки металлостеклянных и металлокерамических изделий. Основным отличием этой системы является наличие вакуумного защитного колпака 5, откачиваемого до давления 10 Па через электромагнитный клапан 8 механическим вакуумным насосом 14.

Как уже отмечалось, создание вокруг изделия 15 области с пониженным давлением (откачка по системе «вакуум в вакууме») предотвращает окисление внешней поверхности при нагреве изделия во время его обезгаживания и значительно снижает скорость проникновения газов из окружающей среды в стенки прибора и его внутреннюю полость. Давление в колпаке измеряется манометрическим преобразователем 11. Напуск атмосферы в колпак перед его подъемом производится через электромагнитный клапан-натекатель 10. Предварительная откачка изделий осуществляется через кран 7, присоединенный к механическому вакуумному насосу 14, откачивающему колпак. По достижении заданного предварительного разрежения в изделии 15 кран 7 закрывается, и открывается высоковакуумный кран 3, который сообщает полость изделия с высоковакуумным насосом 1, снабженным маслоотражателем 4. Выпускной патрубок насоса 1 через электромагнитный клапан 6 соединен с механическим вакуумным насосом 2. Клапаны 12 и 13 служат для напуска атмосферного воздуха в насосы 2 и 14 после их выключения. Для измерения давления предусмотрены манометрические преобразователи 9 и 11.

Принципиальные схемы непрогреваемых вакуумны,

№	Схема	Краткая техническая характеристика
1		$p_{\text{ост}} = 1 \cdot 10^{-4}$ Па Изделие напаяется через стеклянный штенгель
2		$p_{\text{ост}} = 1 \cdot 10^{-4}$ Па Изделие присоединяется через металлический уплотнитель или штенгель
3		$p_{\text{ост}} = 1 \cdot 10^{-4}$ Па Изделие присоединяется через металлический уплотнитель или штенгель

систем откачных постов с давлением выше $5 \cdot 10^{-5}$ Па

Средства откачки	Применение
Пароструйный диффузионный насос с маслоотражателем. Механический вакуумный насос	Лабораторный откачной пост
Пароструйный диффузионный насос с маслоотражателем. Механический вакуумный насос с форвакуумным баллоном	Индивидуальный откачной пост
Пароструйный диффузионный насос с маслоотражателем. Два механических вакуумных насоса	Индивидуальный откачной пост, работающий по системе «вакуум в вакууме»

14.4. ПРОГРЕВАЕМЫЕ ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ ОТКАЧНЫХ ПОСТОВ

Высоковакуумные системы предназначены для получения давлений ниже $5 \cdot 10^{-5}$ Па и должны удовлетворять ряду требований.

Первое требование — *предельно малое собственное газовыделение*.

Это требование вытекает из общего для всех вакуумных систем явления: пока давление в системе еще относительно высоко, весь ход откачки определяется количеством газа, имеющегося в объеме рабочего сосуда или откачиваемого прибора; по сравнению с этим газом количество газа, выделяющегося со стенок вакуумной системы и ее элементов, мало. По мере дальнейшей откачки и с понижением давления количества газов, имеющих в откачиваемом сосуде и выделяющихся с его стенок, становятся сравнимыми, и, чтобы газовыделение со стенок не замедлило откачки и не препятствовало получению высокого вакуума, необходимо вакуумную систему и откачиваемый сосуд тщательно обезгазить. Обычно обезгаживание осуществляется высокотемпературным (600—1000 К) прогревом в течение нескольких часов с одновременной откачкой. Поэтому материалы для сверхвысоковакуумных систем и их деталей не только должны иметь малые скорости собственного газовыделения, но и допускать прогрев до требуемой температуры.

Все разъемные соединения в сверхвысоковакуумных системах выполняются, как правило, с использованием металлических уплотнителей, хотя не исключается возможность применения высококачественных синтетических уплотнителей, разработанных в последнее время.

Второе требование — *предельно малое натекание газа через элементы конструкции вакуумной системы*. Высокая герметичность вакуумной системы может быть обеспечена лишь тщательным изготовлением и надежным контролем вакуумной плотности в процессе сборки системы.

Третье требование — *возможно лучшая защита сверхвысоковакуумной системы от проникновения паров рабочей жидкости насосов* — предъясняется в тех случаях, когда применяют пароструйные диффузионные насосы. Следует отметить, что в настоящее время в сверхвысоковакуумных системах нашли широкое при-

менение безмасляные средства откачки, исключаящие загрязнение системы парами рабочей жидкости.

В табл. 14.2 приведены принципиальные схемы высоковакуумных и сверхвысоковакуумных систем.

В вакуумной системе, построенной по схеме 1 табл. 14.2, предварительная откачка изделия производится механическим вакуумным насосом 7, снабженным сорбционной ловушкой 13, через цельнометаллический прогреваемый кран 9 и электромагнитный клапан 12. Высоковакуумная откачка осуществляется через цельнометаллический кран 3 пароструйным диффузионным насосом 1, снабженным прогреваемой двухъярусной жалюзийной ловушкой 2. Обезгаживание ловушки 2 производится в два этапа: сначала прогревается вся ловушка без подачи жидкого азота; затем в нижний ярус подается жидкий азот, в то время как верхний ярус ловушки продолжает нагреваться. Через 30—40 мин выключается нагрев верхнего яруса, и в него также подается жидкий азот.

Такая конструкция ловушки не только надежно защищает откачиваемый сосуд от паров рабочей жидкости диффузионного насоса 1, но и позволяет получить давление меньше $5 \cdot 10^{-7}$ Па.

Выпускной патрубок насоса 1 через электромагнитный клапан 5 соединяется с механическим вакуумным насосом 6. При выключении насосов 6 и 7 пространство над их входными патрубками заполняется воздухом через клапаны-натекатели 10 и 11. Давление в системе измеряется манометрическими преобразователями 4 и 8.

В вакуумной системе, построенной по схеме 2 табл. 14.2, в качестве сверхвысоковакуумного насоса используется ионно-геттерный или магнитный электро-разрядный насос 1, который производит откачку изделия через цельнометаллический прогреваемый кран 2.

Для откачки сверхвысоковакуумного насоса и вакуумной системы при их обезгаживании, а также для создания предварительного разрежения в изделии предназначен пароструйный диффузионный насос 5 с азотной ловушкой 4. В случае применения магнитного электро-разрядного насоса откачку системы при обезгаживании и предварительную откачку изделия часто производят одним лишь механическим вакуумным насосом, снабженным адсорбционной или азотной ловушкой (см. схему 1 табл. 14.2).

Принципиальные схемы прогреваемых высоко вакуумны

№	Схема	Краткая техническая характеристика
1		$p_{ост} \leq 5 \cdot 10^{-7}$ Па Изделие присоединяется через металлический уплотнитель
2		$p_{ост} \leq 5 \cdot 10^{-7}$ Па Изделие присоединяется через металлический уплотнитель или напайкой через стеклянный штенгель
3		$p_{ост} \leq 5 \cdot 10^{-7}$ Па Изделие присоединяется через металлический уплотнитель

систем откачных постов с давлением ниже $5 \cdot 10^{-6}$ Гг

Средства откачки	Пояснение
Сверхвысоковакуумный агрегат. Два механических вакуумных насоса	Откачные посты для обработки крупных металлокерамических приборов
а) Ионно-геттерный насос, пароструйный диффузионный и механический вакуумный насос; б) Магнитный электроразрядный насос и механический вакуумный насос	Индивидуальные сверхвысоковакуумные откачные посты для обработки особо надежных или маломощных приборов СВЧ и ЛБВ
а) Магнитный электроразрядный насос. Два механических вакуумных и два адсорбционных насоса; б) Магнитный электроразрядный насос и два механических вакуумных насоса	Индивидуальные откачные посты для обработки приборов средней мощности

№	Схема	Краткая техническая характеристика
4		$p_{\text{ост}} \leq 5 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$ Изделие присоединяется через металлический уплотнитель
5		То же

В вакуумной системе по схеме 2 табл. 14.2 предварительная откачка изделия до давления 5 Па осуществляется механическим вакуумным насосом 6 через холодный насос 5. Насос 5 может быть отделен от сверхвысоковакуумной части системы цельнометаллическим прогреваемым краном 3. Выпускной патрубок пароструйного диффузионного насоса 5 соединен с механическим вакуумным насосом 6 через электромагнитный клапан 9. Напуск атмосферы в насос 6 производится через клапан-натекатель 10. Для измерения давления предусмотрены манометрические преобразователи 7 и 8.

Вакуумная система, построенная по схеме 3 табл. 14.2, представляет собой систему с безмасляной откачкой и применением защитного вакуумного колпака.

Предварительная откачка магнитного электроразрядного насоса 1 и вакуумной системы при их обезгажива-

Средства откачки	Применение
Турбомолекулярный насос. Два механических вакуумных насоса	Индивидуальные откачные посты для обработки крупных металлокерамических приборов
Магнитный электроразрядный насос. Два титановых испарительных геттерных насоса. Один механический вакуумный насос	Индивидуальные откачные посты для обработки малошумящих приборов, металлокерамических приборов малой мощности и приборов с фотокатодом

нии, а также предварительная откачка изделия 4 производится через цельнометаллический кран 17 и кран 15 или 21.

В качестве насосов предварительного разрежения применены адсорбционные насосы 10 и 14. Откачка во время регенерации насосов 10 и 14 производится механическим вакуумным насосом 9 через краны 12 и 13.

Сверхвысоковакуумная откачка изделия осуществляется магнитным электроразрядным насосом 1 через цельнометаллический кран 3. Конструктивно краны 3 и 17 могут быть оформлены в блок с одним электромоторным приводом. Защитный вакуумный колпак 18 откачивается механическим вакуумным насосом 8 через электромагнитный клапан 7. Напуск атмосферы в колпак перед его подъемом и в насосы 8 и 9 осуществляется соответственно с помощью клапанов-накателей 6,

11 и 20. Для измерения давления в разных участках вакуумной системы предусмотрены манометрические преобразователи 2, 5, 16 и 19. На рис. 14.1 показан участок цеха, оснащенный сверхвысоковакуумными безмасляными постами откачки, в которых применена

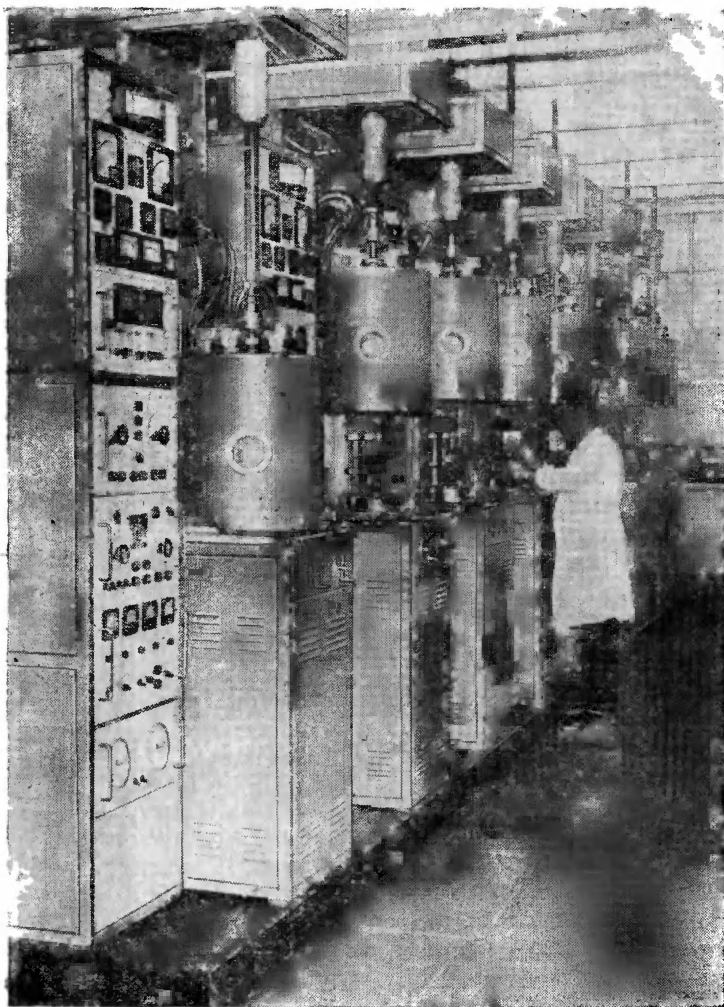


Рис. 14.1. Сверхвысоковакуумные безмасляные посты откачки.

вакуумная система, построенная по схеме, близкой к схеме 3 табл. 14.2.

Вакуумные системы, выполненные по схеме 4 табл. 14.2, нашли применение в постах для откачки крупных металлокерамических электровakuумных приборов.

Предварительная откачка изделий 1 производится через прогреваемый кран 4 механическим вакуумным насосом 16, снабженным адсорбционной ловушкой 8. С целью увеличения срока службы ловушки после предварительной откачки она отключается клапаном 9 от насоса 16.

Высоковакуумная откачка изделия 1 производится через прогреваемый кран 6 турбомолекулярным насосом 7. Насос 7 в свою очередь откачивается через кран 10 механическим вакуумным насосом 16. Откачка защитной камеры 2 производится через кран 15 механическим вакуумным насосом 17. Иногда защитная камера 2 заполняется через кран 14 инертным газом, например аргоном.

После выключения вакуумной системы в турбомолекулярный насос через кран 5 напускают сухой азот, а в насосы 16 и 17 через краны 11 и 12 — воздух. Давление в системе измеряется манометрическими преобразователями 3 и 13.

В вакуумной системе, построенной по схеме 5 табл. 14.2, применена комбинация титанового испарительно-геттерного насоса 16 и магнитного электроразрядного насоса 17, которые откачивают изделие 2 через цельнометаллический кран 4.

Испарительный геттерный насос служит для интенсивной откачки химически активных газов (кислорода, водорода, азота и т. д.), а магнитный электроразрядный насос в основном предназначен для откачки инертных газов (гелия, аргона, неона и т. д.) и метана.

Предварительная откачка изделия 2 осуществляется через цельнометаллический прогреваемый кран 5 и кран 12 с резиновым уплотнением безмасляной системой, состоящей из механического вакуумного насоса 15 с адсорбционной ловушкой 10 и титанового испарительно-геттерного насоса 9. Вначале изделие откачивается механическим вакуумным насосом 15 до давления 5 Па, а затем — испарительным геттерным насосом до давления 10^{-1} — 10^{-2} Па.

Откачка защитного колпака 1 производится через кран 11 механическим вакуумным насосом 14. Для напуска воздуха в защитный колпак и в механические вакуумные насосы после их остановки предусмотрены краны 7, 13 и 18.

Давление в различных участках вакуумной системы измеряют с помощью манометрических преобразователей 3, 6 и 8.

14.5. ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ КАРУСЕЛЬНЫХ И КОНВЕЙЕРНЫХ МАШИН ДЛЯ ОТКАЧКИ ЭВП

Как уже отмечалось, применение карусельных и конвейерных машин позволяет значительно повысить производительность труда по сравнению с откачкой на индивидуальных постах за счет сокращения вспомогательного времени и увеличения числа откачных гнезд.

Откачные позиции конвейерных машин представляют собой независимые вакуумные системы, перемещающиеся по специальным направляющим.

Откачные позиции карусельных машин также могут компоноваться из отдельных независимых вакуумных систем. Часто вакуумные системы карусельных машин выполняются таким образом, что с каруселью перемещаются только откачное гнездо и часть вакуумной системы, в то время как другая часть системы остается неподвижной. При этом коммутация между подвижной и неподвижной частями выполняется золотником (см. § 16.5). Применение золотника, который также играет роль многоходового вакуумного крана, значительно упрощает конструкцию карусельных машин, управление их вакуумными системами и дает возможность снизить массу и габариты вращающихся частей машины.

Золотник может быть расположен как в области высокого, так и в области низкого вакуума. В силу недостаточной герметичности золотника и удлинения вакуумных коммуникаций наблюдается существенное повышение давления за золотником по сравнению с давлением на впускном патрубке соответствующего насоса.

В табл. 14.3 приведены принципиальные схемы вакуумных систем конвейерных и карусельных машин.

Вакуумная система, построенная по схеме 1 табл. 14.3, состоящая из пароструйного диффузионного насоса 1, механического вакуумного насоса 2 и манометрического преобразователя 4, применяется в конвейерных агрега-

тах откачки электронно-лучевых трубок (ЭЛТ). Насосы 1 и 2, откачное гнездо с изделием 3 и электрический блок скомпонованы в единый пост, который перемещается на конвейере. Недостатком схемы следует считать необходимость в периодическом охлаждении пароструйного диффузионного насоса перед каждой установкой нового изделия. Конвейерная линия для откачки ЭЛТ содержит по 165 таких постов.

4. Вакуумная система, построенная по схеме 2 табл. 14.3, применена в 16-позиционном откачном полуавтомате. Шестнадцать откачных позиций разбиты на четыре группы, каждая из которых обслуживается одним многокамерным механическим вакуумным насосом 7, помещенным на нижней части карусели. Предварительная откачка изделия 17 производится через клапан 3 одной из камер многокамерного механического вакуумного насоса. Эта же камера насоса используется для окончательной откачки через клапан 4 защитного колпака 6. Предварительная откачка колпака 6 выполняется стационарным механическим вакуумным насосом 10 через электромагнитный клапан 13 и клапан 5, управляемый механическим приводом 11. Впуск атмосферного воздуха в колпак перед его подъемом производится через электромагнитный клапан 12 и клапан 5, а в многокамерный механический насос 7 через клапан 14. В это время клапан 13 закрыт. При повороте карусели механизм 11 разобщает клапан 5 и стационарную вакуумную систему предварительной откачки и наполнения колпака.

Использование стационарного вакуумного насоса 10 для черновой откачки колпака улучшает условия эксплуатации многокамерных насосов 7, часть камер которых в дальнейшем производит окончательную откачку колпаков.

Окончательная откачка изделия производится через высоковакуумный клапан 8 пароструйным диффузионным насосом 1, снабженным маслоотражателем 2. Электромагнитные клапаны 3 и 8 выполнены в едином корпусе. Выпускной патрубок диффузионного насоса через электромагнитный клапан аварийного закрытия 9 соединен с одной из камер многокамерного механического вакуумного насоса 7. Основным назначением электромагнитного клапана 9 является предотвращение попадания атмосферы и рабочей жидкости в насос 1 из на-

**Принципиальные схемы вакуумных систем
карусельных и конвейерных машин**

№	Схема	Краткая техни- ческая характеристика	Средства откачки	Применение
1	Рис. А	$P_{\text{ост}} = 5 \cdot 10^{-4}$ Па Изделие присоеди- няется через резино- вый уплотни- тель	Пароструйный диф- фузионный насос. Ме- ханический вакуум- ный насос	Конвейерный агре- гат для откачки ЭЛТ
2	Рис. Б	$P_{\text{ост}} = 1 \cdot 10^{-4}$ Па Изделие при- соединяется через метал- лический штенгель	Пароструйный диф- фузионный насос. Многокамерный ме- ханический вакуум- ный насос	Кarusельный полу- автомат для откачки металлостеклянных вакуумных приборов по системе «вакуум в вакууме»
3	Рис. В	$P_{\text{ост}} \leq 10^{-5}$ Па Изделие при- соединяется через метал- лический штенгель	Магнитный электро- разрядный насос. Тур- бомолекулярный на- сос. Двухроторный механический насос. Механический ва- куумный насос	То же
4	Рис. Г	$P_{\text{ост}} = 5 \cdot 10^{-4}$ Па Изделие при- соединяется через резино- вый уплотни- тель	Пароструйный диф- фузионный насос. Многокамерный ме- ханический вакуум- ный насос. Механи- ческий вакуумный на- сос	Кarusельный полу- автомат для откачки ПУЛ и стабилизато- ров напряжения
5	Рис. Д	$P_{\text{ост}} = 1 \cdot 10^{-4}$ Па Изделие при- соединяется через метал- лический штенгель	Пароструйный диф- фузионный насос. Многокамерный ме- ханический вакуум- ный насос. Механи- ческий вакуумный на- сос	Кarusельный полу- автомат для откачки электровакуумных металлостеклянных приборов
6	Рис. Е	То же	То же	То же

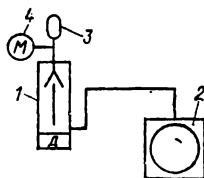


Рис. А

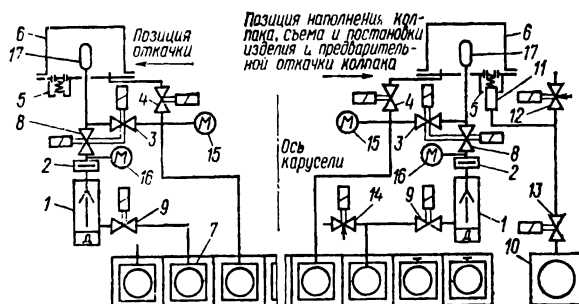


Рис. Б

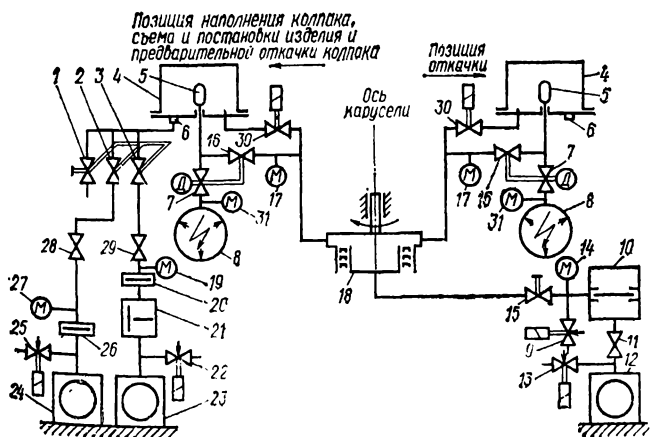


Рис. В

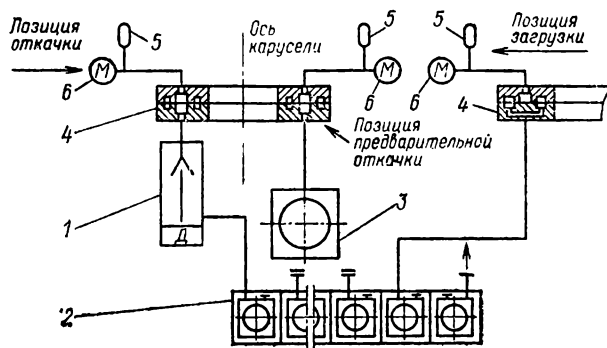


Рис. Г

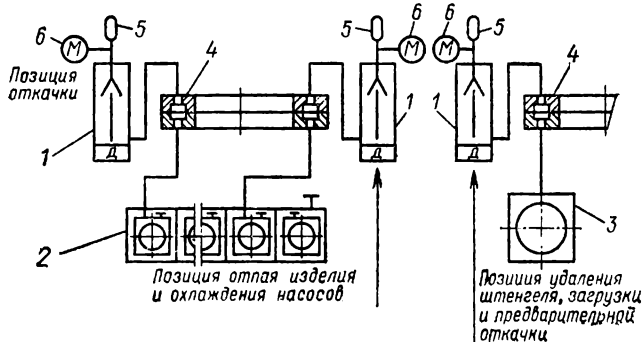


Рис. Д

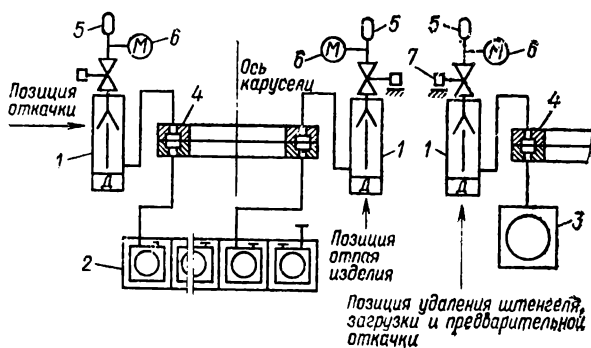


Рис. Е

сосу 7 при аварийном обесточивании системы. Измерение давления в различных участках вакуумной системы осуществляется манометрическими преобразователями 15 и 16. На рис. 14.2 показан внешний вид карусельного беззолотникового полуавтомата откачки, вакуумная система которого выполнена по схеме 2 табл. 14.3.

Вакуумная система, выполненная по схеме 3 табл. 14.3, применена в 16-позиционном сверхвысоковакуумном откачном полуавтомате, предназначенном для обработки особо надежных приборов.

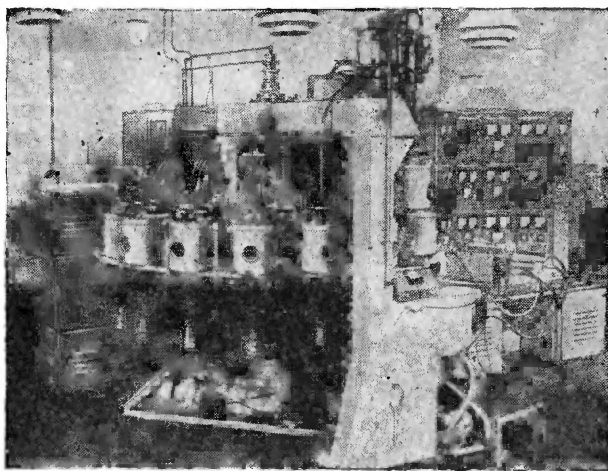


Рис. 14.2. 16-местный беззолотниковый карусельный полуавтомат откачки металлостеклянных приборов по системе «вакуум в вакууме».

Предварительная откачка изделия 5 до давления примерно 1 Па производится через кран 16, подвижное вакуумное соединение 18, кран 15 турбомолекулярным насосом 10. Выпускной патрубок насоса через электромагнитный клапан 11 соединен с механическим вакуумным насосом 12.

Высоковакуумная откачка изделия до давления $1 \cdot 10^{-5}$ Па осуществляется через кран 7 магнитным электроразрядным насосом 8. Краны 7 и 16 скомпонованы в единый блок.

Предварительная откачка колпаков 4 осуществляется через клапан 6, блок клапанов предварительной от-

качки, состоящий из клапанов 1, 2 и 3, последовательно в два этапа: вначале до давления 10 Па через кран 28 механическим вакуумным насосом 24, снабженным ловушкой 26, а затем — до давления $5 \cdot 10^{-1}$ Па через кран 29 двухроторным вакуумным насосом 21, снабженным ловушкой 20. Выпускной патрубок насоса 21 соединен с механическим вакуумным насосом 23.

Откачка колпаков до давления $5 \cdot 10^{-2}$ Па во время проведения технологического процесса осуществляется через электромагнитный клапан 30, подвижное вакуумное соединение 18, кран 15 турбомолекулярным насосом 10.

Перед подъемом колпака на позиции загрузки через клапан 1 в него напускают азот. При выключении полуавтомата через клапаны-натекатели 9, 13, 22 и 25 в отдельные участки вакуумной системы напускают воздух. Для измерения давления в вакуумной системе предусмотрены манометрические преобразователи 14, 17, 19, 27 и 31.

В вакуумной системе, выполненной по схеме 4 табл. 14.3, откачка изделий 5 ведется в три этапа: в начале технологического цикла производится черновая откачка изделий насосом 3, затем предварительная откачка изделий многокамерным механическим насосом 2, и, наконец, изделия проходят обработку при откачке пароструйными диффузионными насосами 1. Для измерения давления в вакуумной системе предусмотрен манометрический преобразователь 6.

В этой схеме золотник 4 расположен между откачным гнездом и пароструйным диффузионным насосом, и для надежной работы золотника его вакуумные каналы защищены кольцевыми проточками, заполняемыми вакуумным маслом либо откачиваемыми механическим вакуумным насосом. Вследствие большой протяженности высоковакуумных коммуникаций и негерметичности золотника такие вакуумные системы даже при тщательном изготовлении всех элементов обеспечивают давление в системе не ниже 0,1 Па.

В вакуумной системе, выполненной по схеме 5 табл. 14.3, золотник 4 расположен в области предварительного разрежения, вследствие чего в системе можно обеспечить меньшее давление, чем в предыдущем случае.

Предварительная откачка изделия 5 и пароструйного диффузионного насоса 1 производится отдельным механическим вакуумным насосом 3. Дальнейшая откачка насосов 1 осуществляется многокамерным насосом 2. Вакуумные системы, построенные по схеме 5 табл. 14.3, применяются в карусельных полуавтоматах откачки с длительным технологическим циклом, продолжительность которого достаточна для охлаждения насоса 1 на одной-двух позициях.

При применении в пароструйных диффузионных насосах рабочих жидкостей с высокой термоокислительной устойчивостью предварительная откачка изделия производится механическим вакуумным насосом через горячий пароструйный диффузионный насос. При этом повышается производительность машин, так как исключается время, необходимое для остывания и разогрева пароструйного диффузионного насоса 1. Для измерения давления в вакуумной системе предусмотрен манометрический преобразователь 6.

Отличительной особенностью вакуумной системы, построенной по схеме 6 табл. 14.3 и имеющей золотник 4 также в области предварительного разрежения, является наличие клапана 7, который исключает необходимость охлаждения пароструйного диффузионного насоса 1 перед постановкой нового изделия 5. В остальной системе повторяет предыдущую и используется в карусельных откачных полуавтоматах с более коротким технологическим циклом. Давление в вакуумной системе измеряют с помощью манометрического преобразователя 6.

14.6. ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Требования, предъявляемые к вакуумным системам оборудования для нанесения тонких пленок, сформулированы в § 14.2, а принципиальное построение вакуумных систем во многом напоминает схемы вакуумных систем индивидуальных откачных постов.

В табл. 14.4 приведены принципиальные схемы вакуумных систем наиболее распространенных установок для нанесения тонких пленок. Вакуумная система, выполненная по схеме 1 табл. 14.4, нашла применение в установках для производства интегральных схем. Рабочая камера 14 предварительно откачивается до дав-

**Принципиальные схемы вакуумных систем оборудования
для нанесения тонких пленок**

№	Схема	Краткая техниче- ская харак- теристика	Средства откачки	Применение
1	Рис. А	$p_{\text{ост}} = 5 \cdot 10^{-8}$ Па	Пароструйный диффузионный насос с азотной ловушкой. Механический вакуумный насос	Установка для производства тонкопленочных элементов и интегральных схем
2	Рис. Б	$p_{\text{ост}} = 5 \cdot 10^{-8}$ Па	Бустерный насос с азотной ловушкой. Механический вакуумный насос	Установка для производства многослойных тонкопленочных элементов микросхем методом ионного испарения металлов
3	Рис. В	$p_{\text{ост}} = 5 \cdot 10^{-7}$ Па	Ионно-геттерный насос. Пароструйный диффузионный насос. Механический вакуумный насос	Исследовательская установка для отработки тонкопленочной технологии
4	Рис. Г	$p_{\text{ост}} = 1,0 \times 10^{-4}$ Па	Семь пароструйных диффузионных насосов. Три двухроторных вакуумных агрегата	Линия непрерывного действия для изготовления пассивных тонкопленочных элементов

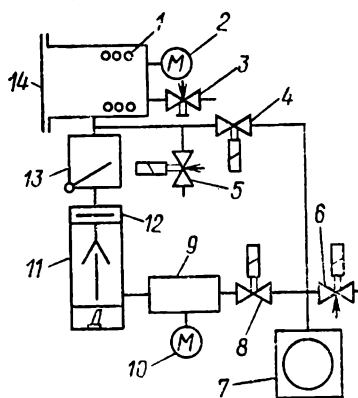


Рис. А

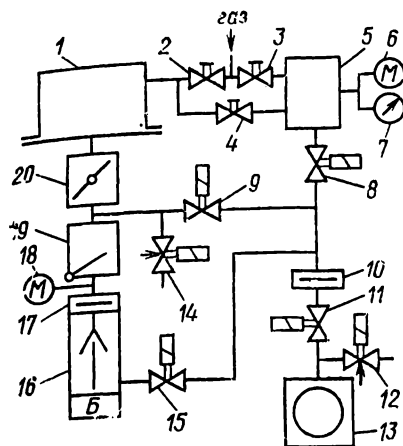


Рис. Б

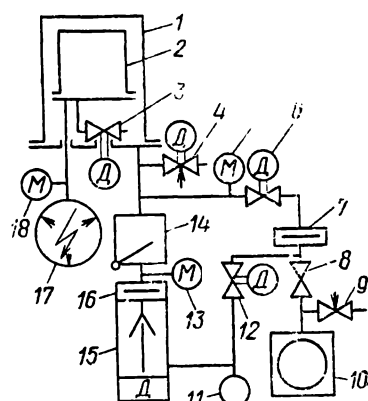


Рис. В

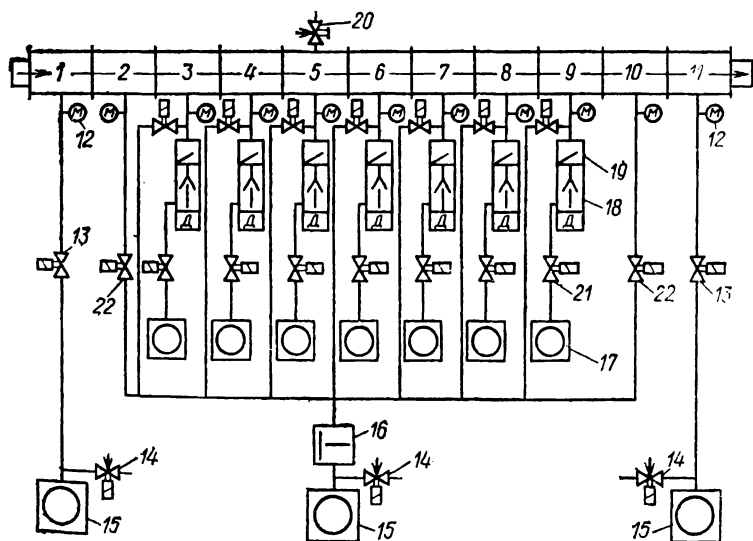


Рис. Г

ления 5 Па через кран 4 механическим вакуумным насосом 7, который в это время отсоединен от пароструйного диффузионного насоса 11 краном 8. Затвор 13 закрыт, а насос 11 работает на форвакуумный баллон 9. После достижения давления около 10 Па высоковакуумная откачка рабочей камеры до давления $1 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-5}$ Па осуществляется через азотную ловушку 12 высоковакуумным насосом 11; при этом кран 4 закрыт, а кран 8 открыт. При выключении насоса 7 в него напускают воздух через электромагнитный клапан 6. Краны 4 и 8 и электромагнитный клапан 6 смонтированы в один блок.

Давление в вакуумной системе измеряют манометрическими преобразователями 2 и 10.

Часто внутри рабочей камеры 14 размещают охлаждаемую жидким азотом ловушку 1 (мейснеровская ловушка), назначение которой — улучшить вакуум в камере при значительном газовыделении некоторых материалов при их испарении.

С этой же целью в ряде конструкций устанавливают в рабочей камере дополнительные титановые испарительные геттерные насосы или криосорбционные насосы, охлаждаемые жидким гелием. Для напуска воздуха или газа в рабочую камеру предусмотрены электромагнитный натекаль 5 и ручной натекаль 3.

Вакуумная система, изготовленная по схеме 2 табл. 14.4, используется в установках для производства многослойных тонкопленочных элементов микросхем методом ионного испарения материалов. В качестве основного средства откачки применен бустерный насос 16 с азотной ловушкой 17, который откачивает рабочую камеру 1 до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па через затвор 19. Затем из смесительного бака 5, который может быть предварительно откачан через кран 8, с помощью игольчатых натекаль 2, 3 и 4 газ или смесь газов подается в рабочую камеру, и давление в ней возрастает до 15 — 5×10^{-1} Па.

Уровень рабочего давления в камере стабилизируется и регулируется как изменением потока газа, напускаемого через игольчатые натекаль, так и положением заслонки 20, изменяющей эффективную быстроту откачки рабочей камеры 1.

Предварительная откачка рабочей камеры через кран 9 и насоса 16 через краны 15 и 11 осуществляется

механическим вакуумным насосом 13, снабженным водоохлаждаемым маслоотражателем 10. Электромагнитный клапан 14 служит для напуска воздуха в систему, а клапан 12 — в насос 13. Измерение давления в различных участках системы производится манометрическими преобразователями 7 и 18.

Как уже отмечалось, вакуумные установки колпакового типа с использованием резиновых уплотнителей не позволяют получать высокий вакуум из-за невозможности производить высокотемпературный прогрев с целью обезгаживания рабочей камеры. Применение металлических уплотнителей при частых подъемах и опусканиях колпака значительно затрудняет эксплуатацию оборудования. Поэтому для получения давления меньше 10^{-5} Па в лабораторных установках для нанесения тонких пленок оказалось целесообразным использование двухстенных рабочих камер, выполненных по системе «вакуум в вакууме».

Сверхвысоковакуумная система, изготовленная по этому принципу, соответствует схеме 3 табл. 14.4.

Наружная водоохлаждаемая толстостенная камера 1 уплотняется с плитой с помощью резинового уплотнителя и через кран 6 с моторным приводом, водоохлаждаемую ловушку 7 и кран 8 предварительно откачивается механическим вакуумным насосом 10 до давления 10^{-1} Па. Затем камера 1 через затвор 14 и азотную ловушку 16 откачивается до давления 10^{-3} — 10^{-4} Па пароструйным диффузионным насосом 15.

Внутренняя тонкостенная рабочая камера 2 предварительно откачивается до давления 10^{-3} — 10^{-4} Па через кран 3 с моторным приводом, установленным в камере 1, одновременно с наружной камерой.

Высоковакуумная откачка рабочей камеры 2 до давления $5 \cdot 10^{-7}$ Па производится ионно-геттерным насосом 17. Для обезгаживания рабочей камеры 2 прогревом до 700 К через ее тонкие стенки пропускают электрический ток при непрерывной откачке камер 1 и 2.

Уплотнение внутренней камеры осуществлено по притертым поверхностям. Благодаря тому, что вокруг камеры 2 создано достаточно высокое разрежение, перетекание газа из камеры 1 в камеру 2 незначительно. Газ в камеру 1 напускается с помощью натекаателя 4, а в механический насос — натекателем 9.

При предварительной откачке камер 1 и 2 насосом 10 последний отсоединяется от высоковакуумного насоса 15 краном 12, причем роль форвакуумного баллона в это время выполняет отсоединенный трубопровод, объем которого оказывается достаточным для поддержания необходимого выпускного давления на патрубке насоса 15. Для измерения давления в системе предусмотрены манометрические преобразователи 5, 11, 13 и 18.

Вакуумная система, выполненная по схеме 4 табл. 14.4, нашла применение в высокопроизводительной линии непрерывного действия для производства резисторов. Линия состоит из 11 камер, соединенных друг с другом вакуумными шлюзами. Изделия перемещаются из камеры в камеру (слева направо) с помощью транспортирующего устройства, обеспечивающего за счет небольших зазоров в шлюзах минимальное натекание газа из одной камеры в другую.

Во входной камере 1 происходит понижение давления от атмосферного до 400 Па путем откачки через кран 13 механическим вакуумным насосом 15. В камере 2, которая откачивается через кран 22 двухроторным насосом 16 и насосом 15, понижается давление до $(6-4) \cdot 10^{-4}$ Па.

В камере 5, где происходит нанесение резистивных покрытий, после откачки до давления $(6-4) \cdot 10^{-4}$ Па с помощью натекателя 20 создается давление аргона порядка 6—4 Па. В камерах 6 и 7, где происходит нанесение других покрытий, вновь понижается давление до $(6-4) \cdot 10^{-4}$ Па.

В камерах 9—11 осуществляется постепенное повышение давления до атмосферного. Как видно из схемы, каждая высоковакуумная камера (с 3 по 9) откачивается индивидуальной вакуумной системой, состоящей из механического насоса 17, электромагнитного клапана 21, пароструйного диффузионного насоса 18, затвора 19 и манометрического преобразователя 12. Предварительная откачка этих камер до давления 10—1 Па производится одним вакуумным агрегатом, состоящим из двухроторного вакуумного насоса 16, механического вакуумного насоса 15 и клапана-натекателя 14.

14.7. ЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ ФОРВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Централизованные форвакуумные системы (ЦФС) в основном предназначены для откачки вакуумных

установок до давления около 5 Па и создания предва-
 рительного разрежения на выходе пароструйных диффу-
 зионных насосов или запуска магнитных электроразряд-
 ных насосов. Применение централизованных форвакуум-
 ных систем улучшает условия работы и эксплуатации
 вакуумных установок, исключает вибрации, шум и за-
 грязнение воздуха в производственных помещениях. При
 этом появляется возможность заменить большое количе-

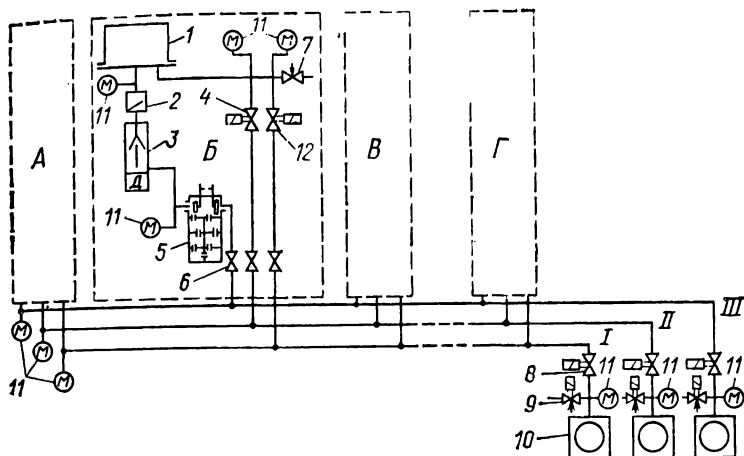


Рис. 14-3. Схема централизованной многотрубной форвакуумной системы.

ство механических вакуумных насосов с малой произво-
 дительностью одним или несколькими насосами с боль-
 шей производительностью, что повышает коэффициент
 загрузки насосов и облегчает их обслуживание. На
 рис. 14.3 представлена схема централизованной много-
 трубной форвакуумной системы.

Насосная станция системы состоит из трех механиче-
 ских вакуумных насосов 10 с электромагнитными кла-
 панами 8, электромагнитными клапанами напуска воз-
 духа 9 и манометрическими преобразователями 11. Кла-
 паны 8 и 9 заблокированы таким образом, что при
 выключении или внезапной остановке насоса 10 вна-
 чале закрывается клапан 8 и затем в насос напускается воз-
 дух через открытый клапан 9.

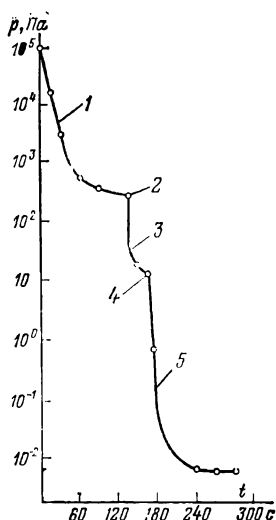


Рис. 14.4. Изменение давления во времени при откачке камеры централизованной форвакуумной системой. 1 — откачка через трубопровод I; 2 — момент срабатывания клапана 4; 3 — откачка через трубопровод II; 4 — момент открытия затвора 2; 5 — откачка камеры I через затвор 2 пароструйным диффузионным насосом 3 с быстрой действия $S_E = 100$ л/с, работающим на трубопровод III (см. рис. 14.3).

Трубопровод I, откачиваемый насосом 10, предназначен для создания предварительного разрежения $(1-4) \cdot 10^2$ Па в камерах I установок А, Б, В, Г.

Трубопровод II служит для создания в камерах установок разрежения $15-5$ Па, достаточного для включения пароструйных диффузионных насосов 3.

Трубопровод III предназначен для постоянной откачки пароструйных диффузионных насосов 3 через предохранительные устройства 5, которые предназначены для защиты от прорыва воздуха в трубопровод III.

Вакуумные системы установок снабжены электромагнитными клапанами 4, 12 и кранами 6, 7, управление которыми осуществляется блоком контроля вакуума. Блок контроля вакуума по достижении в камере I давления $(1-4) \cdot 10^2$ Па дает команду на ее отсоединение от трубопровода I, а после достижения давления 5 Па — от трубопровода II и на открытие затвора 2. В качестве датчика давления в блоке контроля вакуума используются манометрические преобразователи 11.

В централизованных форвакуумных системах, откачивающих установки с пароструйными диффузионными или турбомолекулярными насосами, для защиты трубопровода III от попадания в него воздуха при выходе из строя одной из установок применяются предохранительные устройства 5.

На рис. 14.4 приведена кривая изменения давления во времени (кривая откачки) в камере I с объемом около 20 л, подключаемой к ЦФС.

Как видно из рисунка, длительность откачки сосуда от атмосферного давления до давления $6 \cdot 10^{-3}$ Па составляет менее 5 мин.

15.1. РАЗБОРНЫЕ ВАКУУМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Разборные вакуумные соединения относятся к числу наиболее ответственных узлов любой вакуумной системы. Это связано с тем, что потеря вакуумной плотности вакуумной системы чаще всего вызывается разгерметизацией разборного соединения.

При выборе конструкции разборного соединения для работы в конкретной вакуумной системе необходимо руководствоваться следующими характеристиками:

1) *натеканием*, т. е. количеством газа, протекающего в единицу времени в вакуумный сосуд между поверхностями уплотнителя и элементом соединения, а также за счет проницаемости газа через материал уплотнителя;

2) *газовыделением* с поверхностей уплотнителя и элементов соединения, соприкасающихся с вакуумным сосудом;

3) *механической прочностью* соединения;

4) *термической стойкостью*, т. е. способностью выдерживать многократные нагревы и охлаждения без нарушения герметичности;

5) *химической стойкостью*;

6) *легкостью монтажа и демонтажа* соединения и степенью сложности его изготовления;

7) *простотой проверки герметичности*.

В разборных вакуумных соединениях в зависимости от предъявляемых требований к разрежению в вакуумной системе могут быть использованы как неметаллические, так и металлические уплотнители.

Разъемные соединения с неметаллическими уплотнителями. Соединения с неметаллическими уплотнителями (резинами) просты в изготовлении и надежны в эксплуатации, но имеют ограниченную термическую стойкость и, как правило, повышенное газовыделение уплотнителя, вследствие чего чаще всего применяются в *непрогреваемых* вакуумных системах при давлениях не меньше $5 \cdot 10^{-5}$ Па.

— При конструировании разборного соединения с неметаллическим уплотнителем необходимо учитывать следующие общие требования:

а) резиновый уплотнитель не должен воспринимать механические нагрузки и влиять на точность установки деталей;

б) для достижения вакуумной плотности соединения резиновый уплотнитель в зависимости от твердости материала должен быть сдеформирован по своей толщине на 20—40 %;

в) резины практически несжимаемы, т. е. при деформации их объем остается постоянным. Поэтому сечение канавки под уплотнитель должно быть на 2—5 % больше, чем сечение уплотнителя;

г) фланцы разъемного соединения рекомендуется затягивать до соприкосновения металлических поверхностей;

д) поверхность резинового уплотнителя, обращенная в вакуумную полость, должна быть сведена к минимуму.

Наиболее распространенные схемы соединений с резиновыми уплотнителями приведены в табл. 15.1.

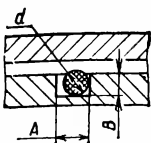
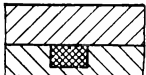
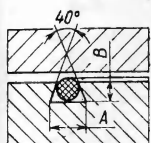
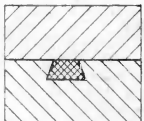
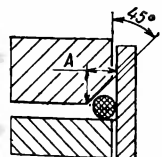
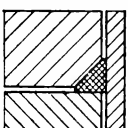
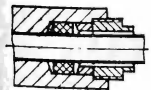
Разъемные соединения с металлическими уплотнителями. Соединения с металлическими уплотнителями предназначены для применения в прогреваемых вакуумных системах с давлением меньше $5 \cdot 10^{-5}$ Па и должны выдерживать длительные и многократные прогревы до температуры 600—900 К во время обезгаживания.

В конструкциях прогреваемых разъемных соединений уплотнение достигается путем *пластической* деформации уплотняющей металлической прокладки. При пластической деформации материал заполняет все имеющиеся на поверхностях уплотняющих фланцев микронеровности. Вследствие того, что текучесть металлов по сравнению с резинами невысока, необходимо уплотняющие поверхности фланцев изготавливать с малой шероховатостью. Для уплотнения соединения с металлической прокладкой требуются значительно большие удельные давления, чем в случае уплотнения с резиновой или фторопластовой прокладками.

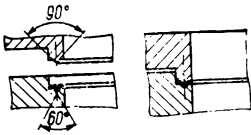
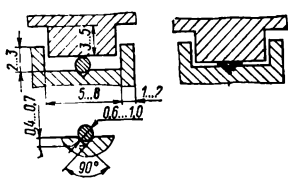
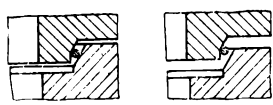
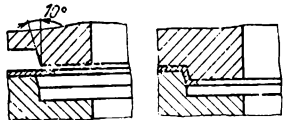
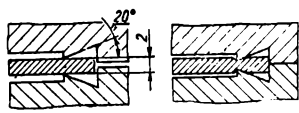
Металлические уплотнители практически, исключают проникновение газов через материал уплотнителя, а газовыделение их примерно в 10^5 раза меньше, чем у лучших сортов вакуумных резин.

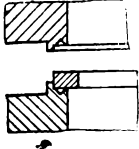
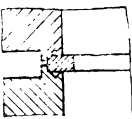
Схемы наиболее распространенных соединений с металлическими уплотнителями приведены в табл. 15.2.

Принципиальные схемы соединений с резиновыми уплотнителями

Схема соединения		Примечание
разобранное	собранное уплотнение	
		Уплотнение осуществляется при смыкании фланцев металл на металл. Для уплотнителя круглого сечения диаметром d: $B/d = 0,72$; $A/d = 1,15$ Для уплотнителя квадратного сечения со стороной C: $B/C = 0,75$; $A/C = 1,4$
		Для уплотнителя круглого сечения диаметром d: $B/d = 0,75 \div 0,8$; $A/d = 0,9$
		Уплотнитель круглого сечения диаметром d: $A \approx 1,32d$
		Уплотнитель квадратного или прямоугольного сечения. Применяется для присоединения к вакуумным системам манометрических преобразователей и трубопроводов диаметром до 18 мм

Принципиальные схемы соединений с металлическими уплотнителями

№	Схемы соединений		Примечания
	разобранное	собранное уплотненное	
1.			Соединение может подвергаться многократному нагреву до 600 К (алюминевый уплотнитель) или 750 К (медный уплотнитель)
2			Уплотнитель — свинцовое кольцо $\varnothing$ 4—6 мм или индиевое кольцо $\varnothing$ 0,6—1,0 мм. Может подвергаться нагреву до 400 К
3			Уплотнитель — медное кольцо $\varnothing$ 1,0—1,25 мм. Может подвергаться многократному нагреву до 750 К
4			Уплотнитель — медное плоское кольцо. Может подвергаться многократному нагреву до 1100 К и охлаждению до температуры жидкого азота
5			Уплотнитель — медное плоское кольцо. Может подвергаться многократному нагреву до 750 К и охлаждению до температуры жидкого азота

№	Схема соединения		Примечания
	разборное	собранные уплот- ненное	
6			Уплотнитель для ДУ < 100 мм медное плоское кольцо; для больших размеров медное кольцо Ø 2,5 мм. Может подвергаться нагреву до 750 К

Соединение с *канавочно-клиновым* профилем (схема 1 табл. 15.2) применяется для трубопроводов с диаметром условного прохода (ДУ) до 500 мм. Углы профиля канавки и клина делаются соответственно 60 и 90°, с тем чтобы уплотнение металлической прокладки происходило между кромкой канавки и конической поверхностью клина, благодаря чему значительно уменьшаются площадь прокладки, подвергающаяся деформации, а следовательно, и усилие, необходимое для надежного уплотнения. Поверхности профилей канавочно-клинового соединения должны иметь шероховатость не более 0,5 мкм.

Уплотнители, изготовленные из алюминия, допускают прогрев до 600 К, так как при прогреве до более высокой температуры наблюдается диффузионная сварка уплотнителя с уплотняющими поверхностями. Толщина алюминиевого уплотнителя должна быть не более 0,5 мм из-за большого температурного коэффициента линейного расширения алюминия. Уплотнители, изготовленные из меди марки М1, допускают прогрев до 750—900 К.

В отечественной вакуумной технике в системах с давлением ниже $1 \cdot 10^{-5}$ Па до последнего времени, как правило, употреблялось соединение с канавочно-клиновым профилем и медным уплотнителем.

С целью повышения надежности уплотнения и уменьшения уплотняющего усилия медные уплотнители подвергаются вакуумному или водородному отжигу при 1100 К в течение 5 мин. Иногда отжиг уплотнителя производят в восстановительном пламени газовой горел-

Кй с охлаждением в воде или на воздухе с последующими травлением и промывкой.

Относительно тонкие фланцы соединения с канавочно-клиновым профилем имеют легко деформируемые компенсирующие пояса, препятствующие короблению фланцев при перепадах температуры во время их прогрева. Эти же пояса дают возможность приваривать окончательно обработанные фланцы к корпусам или трубам, так как все поводки, возникающие при сварке, либо гасятся на этих поясах, либо свободно выбираются при стягивании фланцев часто поставленными стяжными шпильками.

Существенными недостатками этого типа соединений являются сложность контроля номинальных геометрических размеров уплотняющих фланцев и возможность возникновения воздушных карманов в зоне контакта, которые могут стать источниками медленного натекания в вакуумную систему. К недостаткам соединения этого типа следует также отнести значительную металлоемкость, большие габариты и необходимость применения большого количества стяжных шпилек.

Соединение по схеме 2 табл. 15.2 со свинцовым или индиевым кольцом в качестве уплотнителя требует для стягивания значительно меньших усилий, чем в случае медных и алюминиевых уплотнителей, но допускает прогрев лишь до 400 К.

Индиевые уплотнители изготавливаются из проволоки диаметром от 0,6 до 1 мм. Индий достаточно надежно уплотняет не только металлические детали, но и такие материалы, как стекло и керамика. В конструкции соединения по схеме 2 табл. 15.2 индиевая проволока раздавливается и заполняет канавку и зазоры между стыкуемыми поверхностями. Шероховатость стыкуемых поверхностей, зуба и канавки должна быть не более 2 мкм.

Уплотнение конического соединения (схема 3 табл. 15.2) осуществляется за счет пластического течения материала вследствие больших сил трения. В качестве уплотнителя чаще всего применяют медную отожженную проволоку диаметром 1—1,25 мм, а иногда плоское медное кольцо толщиной 0,12—0,25 мм (схема 4 табл. 15.2). При затяжке фланцев силы трения, возникающие на поверхности уплотнителя и фланцев, разрушают пленку окислов и другие поверхностные

загрязнения, создавая тем самым условия для местной сварки чистых металлических поверхностей.

Экспериментально установлено, что оптимальный угол конуса для уплотнителя из медного кольца круглого сечения должен быть равен 30° , а для плоского кольца — 20° .

Уплотнения конического типа нашли применение для фланцевых соединений с условным проходом до 300 мм. Основные преимущества соединения состоят в отсутствии закрытых воздушных карманов, легкости контроля всех геометрических размеров уплотняющего профиля, в простоте изготовления уплотнителя и в относительно небольших усилиях герметизации. Соединение может надежно работать и выдерживать нагрев и охлаждение даже после снятия герметизирующего усилия с фланцев.

Однако отсутствие у фланцев конического соединения посадочных мест и плоских стыковочных поверхностей требует строгого монтажа соединения с тем, чтобы не допустить перекосов и нарушения схемы деформации уплотнителя. Следует также заметить, что надежность соединения резко снижается при неравномерном нагреве или охлаждении стягивающих фланцев. Так, если температура фланца с охватывающим конусом окажется выше температуры ответного фланца, то соединение будет стремиться как бы «открыться», что приведет к его разуплотнению.

Фланцевое соединение, выполненное по схеме 5 табл. 15.2, допускает многократный, прогрев до температуры 800 К и охлаждение до температуры жидкого азота и не дает заметного натекания при давлениях ниже 10^{-10} Па. При внедрении конических кромок в плоское медное кольцо происходит холодное течение материала прокладки к внутренним цилиндрическим поверхностям фланцев. Так как дальнейшее течение материала прокладки из зоны уплотнения жестко ограничено, создаются высокие давления между уплотняющими поверхностями, вследствие чего происходит заполнение всех микронеровностей и надежное уплотнение соединения. Толщина медной уплотняющей прокладки обычно около 2 мм.

Преимуществом данного типа уплотнения является то, что конические уплотняющие поверхности находятся в углублении, благодаря чему уменьшается вероятность

их повреждения. Для обеспечения уплотнения достаточно сравнительно небольшой деформации медной прокладки. Оба фланца имеют одинаковую геометрию, что снижает их стоимость и обеспечивает взаимозаменяемость. Габариты и металлоемкость соединения в 1,5—2 раза меньше, чем конструкции, выполненной по схеме 1 табл. 15.2. Подобная схема уплотнения нашла применение для фланцев с условным проходом от 70 до 250 мм.

Механизм работы фланцевого уплотнения, выполненного по схеме 6 табл. 15.2, близок к механизму работы фланцевого уплотнения, описанного выше. Для фланцевых соединений с условным проходом до 100 мм рекомендуется использовать медный уплотнитель в виде плоского кольца, а для фланцевых соединений больших размеров — уплотнитель из медной проволоки диаметром 2,5 мм.

15.2. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДВИЖЕНИЯ В ОТКАЧИВАЕМЫЙ СОСУД

Возможность использования того или иного устройства для ввода движения в значительной степени определяется конструкцией *уплотнительного элемента*, передающего движение в откачиваемый сосуд.

Конструкция уплотнительного элемента определяет диапазон рабочих давлений и температур, максимально возможную передаваемую нагрузку, максимально допустимые скорость и перемещение ведомого звена в вакууме, кинематическую точность, срок службы и другие параметры ввода.

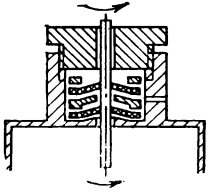
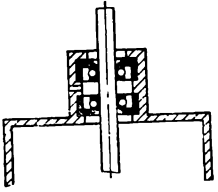
В зависимости от конструкции уплотнительного элемента вводы движения могут быть разбиты на три группы:

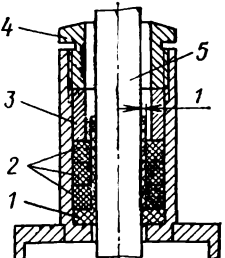
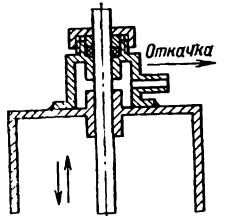
1. Вводы движения с *контактным уплотнительным элементом*.
2. Вводы движения с *деформируемым уплотнительным элементом*.
3. Вводы движения с *неподвижным уплотнительным элементом*.

В вводах с контактным уплотнительным элементом движущееся звено, передающее нагрузку, имеет постоянный механический контакт с неподвижным уплотнителем, размещенным в корпусе устройства.

Таблица 153

Вводы движения с контактным уплотнительным элементом

№	Наименование ввода движения	Схема конструкции	Диапазон рабочих давлений, Па	Максимальная температура прогрева, К	Виды передаваемого движения	Скорость перемещения в вакууме v , м/с, л, об/мин
1	С уплотнителем в виде прокладок (уплотнение Вильсона)		$10^{-3} - 10^{-5}$	Зависит от материала уплотнителя (см. табл. 17.1)	Вращательное, поступательное	$v=0,5$
2	С резиновыми армированными манжетами		$10^{-3} - 10^{-5}$	То же	Вращательное	$v=10$

№	Наименование ввода движения	Схема конструкции	Диапазон рабочих давлений, Па	Максимальная температура прогрева, К	Виды передаваемого движения	Скорость перемещения в вакууме v , м/с, n , об/мин
3	С самосмазывающимся уплотнителем		10^{-8} — 10^{-5}	450	Вращательное	$n=1500 \div 3000$
4	С щелевым и контактным уплотнением		10^{-6} — 10^{-7}	700—1000 при охлаждении контактного уплотнителя	Вращательное, поступательное, комбинированное	$v=10$

Примечания. 1. Все вводы движения с контактным уплотнением обеспечивают жесткую кинематическую связь.
2. Максимальный передаваемый момент вводов движения определяется прочностью силового звена.

В табл. 15.3 приведены основные схемы конструкций вводов с контактным уплотнительным элементом.

Уплотнительные элементы в конструкциях по схемам 1, 2 табл. 15.3 изготавливаются из маслостойкой вакуумной резины. Надежная работа устройства может быть обеспечена лишь при полированной поверхности вала и тщательном изготовлении резиновых колец. Особое внимание следует обращать на качество изготовления внутренних кромок резиновых колец. Между резиновыми кольцами заливается вакуумное масло. Устройство требует частого контроля и поэтому должны быть расположены в удобных для обслуживания местах.

Ввод движения, выполненный по схеме 3 табл. 15.3, с фторопластовой втулкой не требует смазки, что выгодно его отличает от вводов по схемам 1, 2 табл. 15.3. Так как фторопласт-4 менее упруг, чем резина, и имеет значительную остаточную деформацию, для компенсации износа и обеспечения плотного контакта уплотняющей фторопластовой втулки 1 с подвижным полированным валом 5 используются упругие свойства резиновых колец 2, предварительно деформированных с помощью нажимной гайки 4 и втулки 3.

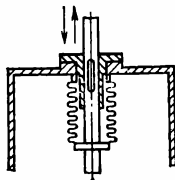
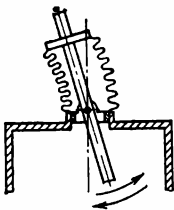
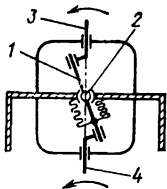
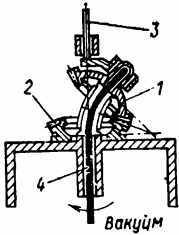
В ряде сверхвысоковакуумных установок нашли применение вакуумные вводы движения с промежуточной откачкой, выполненные по схеме 4 табл. 15.3.

Уплотнение вала, отделяющее камеру с промежуточным давлением от атмосферы, изготовлено в виде сальника. Уплотнение вала в стенке, отделяющей откачиваемый сосуд от камеры с промежуточным давлением, осуществляется за счет малых зазоров между валом и стенкой.

В вводах движения с *деформируемым* уплотнительным элементом движущееся звено связано с гибким герметичным уплотнителем, закрепленным в неподвижном корпусе устройства и деформирующимся во время работы ввода.

Для надежной и долговечной работы вакуумных вводов движения необходимо, чтобы герметизирующий элемент не *воспринимал передаваемые устройством усилия*. Направляющие и опоры устройства желательно помещать вне вакуумной полости ввиду больших коэффициентов трения в вакууме.

Схемы конструкций вводов движения с деформируемым уплотнительным элементом приведены в табл. 15.4.

Номер схемы	Наименование ввода движе- ния	Схема конструкции	Диапазон бочих дав- ний, Па
1	Ввод поступательного движения		$10^{-3} - 10^{-4}$ $10^{-5} - 10^{-8}$
2	Ввод качательного дви- жения		$10^{-3} - 10^{-5}$ $10^{-5} - 10^{-8}$
3	Ввод вращения с про- странственным шарни- ром		$10^{-3} - 10^{-5}$ $10^{-5} - 10^{-8}$
4	Ввод вращения с раз- грузкой гибкого уплот- нительного элемента		$10^{-5} - 10^{-7}$

руемым уплотнительным элементом

Максимальная температура прогрева, К	Вид уплотнителя	Частота вращения и величина перемещения n , об/мин, L , м	Кинематическая жесткость	Максимальный передаваемый момент, Н·м
350—450 (см. табл. 17.1)	а) Резиновая мембрана	L —10% от наружного диаметра мембраны	Жесткая связь	Определяется прочностью силового звена
450—1000	б) Металлический сильфон	L в зависимости от характеристик сильфонов	То же	
350—450 (см. табл. 17.1)	а) Резиновая мембрана	$\alpha=10\div 20^\circ$	То же	Определяется прочностью подшипникового узла
450—1000	б) Металлический сильфон		То же	
350—450 (см. табл. 17.1)	а) Резиновая мембрана	n до 100	Зависит от конструкции	Определяется прочностью звеньев, находящихся в вакууме
450—1000	б) Металлический сильфон	n до 500		
450—1000	Металлический сильфон	n до 500	То же	Более 200

Номер схемы	Наименование ввода движе- ния	Схема конструкции	Диапазон ра- бочих давле- ний, Па
5	Ввод вращения с проме- жуточным звеном, со- вершающим плоскопа- раллельное движение		$10^{-3} - 10^{-5}$ $10^{-5} - 10^{-8}$
6	Ввод вращения с ис- пользованием волно- вой передачи		$10^{-5} - 10^{-8}$

Вводы движения с применением металлических сильфонов или резиновых диафрагм, выполненные по схеме 1 табл. 15.4, надежнее устройств, приведенных в табл. 15.3, и проще в эксплуатации, но могут обеспечить сравнительно небольшие перемещения. Для увеличения длины перемещения в некоторых конструкциях вместо одного металлического сильфона применяют гирлянду сильфонов или телескопические сильфоны, как это показано на рис. 15.1.

Уплотнение ввода осуществляется большим внешним сильфоном 1 и двумя внутренними сильфонами 2 и 3.

Максимальная температура нагрева, К	Вид уплотнителя	Частота вращения и величина перемещения: n , об/мин, L , м	Кинематическая жесткость	Максимальный передаваемый момент, Н·м
350—450 (см. табл. 17.1)	а) Резиновая мембрана	n до 100	Зависит от конструкции	3
450—1000	б) Металлический сальфон			
450—800	Металлическая гибкая оболочка	n до 500	То же	До 150

Сальфон 1 приварен одним концом к фланцу 4, а другим к стакану 5. Стакан 5 фиксируется относительно фланца 4 стопорным кольцом 6. Сваренные между собой сальфоны 2 и 3 приварены в свою очередь одним концом к штоку 7, а другим — к стакану 5. Шток 7 присоединяется к ведущему звену привода с помощью пальца 8, а к ведомому звену в вакуумном сосуде — с помощью радиально-сферического подшипника.

Работает ввод следующим образом: при перемещении штока 7 вправо вначале сжимается внешний сальфон 1 и выбирается ход l_1 , а затем сжимаются два вну-

тренных сальфона 2 и 3 и выбирается ход l_2 каждого сальфона. Таким образом, максимальный ход штока составит $L=l_1+l_2$.

Угол качательного движения ввода, выполненного по схеме 2 табл. 15.4, из-за соображения надежности ограничен допустимой деформацией уплотнительного элемента — металлического сальфона или резиновой мембраны.

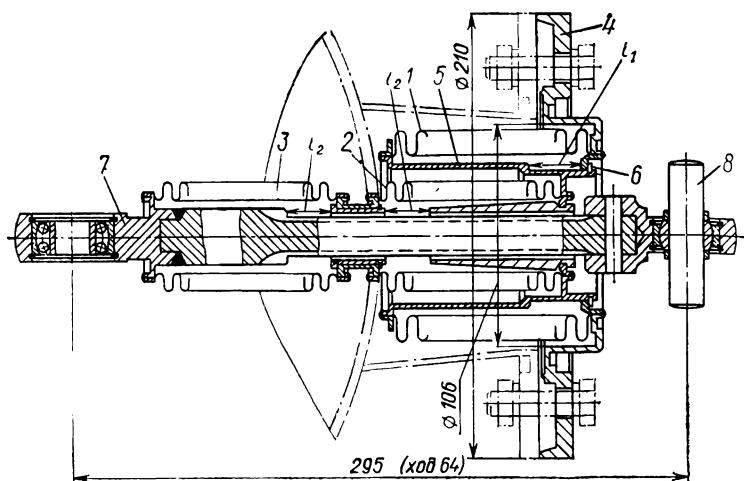


Рис. 15.1. Ввод поступательного движения с телескопическими сальфонами.

В конструкции ввода по схеме 3 табл. 15.4 промежуточное звено 1 описывает коническую поверхность с вершиной в центре пространственного шарнира 2. Крутящий момент от сил трения, возникающий в шарнирах между промежуточным звеном 1 и ведущим и ведомым валами 3 и 4, может восприниматься гибким уплотнительным элементом. Применение пространственного шарнира, воспринимающего крутящий момент, позволяет исключить касательные напряжения (скручивание), вследствие чего уплотнительный элемент будет нагружен лишь напряжениями изгиба, что повысит надежность и долговечность его работы.

Для передачи вращения в вакуумную полость при больших моментах сопротивления применен ввод, выполненный по схеме 4 табл. 15.4. Характерной особенностью ввода движения по этой схеме является исполь-

зование планетарного механизма для разгрузки сильфона от скручивающих его оболочку усилий. Во вводе вращения передается с помощью вала 4 с изогнутым концом, который входит в глухую расточку промежуточного звена 1. Промежуточное звено с жестко закрепленным коническим сателлитом в свою очередь вставлено по ходовой посадке в наклонную расточку в ведущем вводе 3. Момент от сил трения, возникающих в опорах промежуточного звена, воспринимается планетарной шестеренчатой передачей, сателлит и солнечная коническая шестерня 2 которой имеют одинаковое число зубьев.

Для передачи вращения в откачиваемый сосуд часто применяют сравнительно простое по конструкции и технологии изготовления устройство, выполненное по схеме 5 табл. 15.4.

В этом устройстве промежуточное звено 1 совершает плоскопараллельное движение по цилиндрической поверхности с радиусом, равным эксцентриситету e с центром на общей оси ведущего и ведомого валов 2 и 3. Крутящий момент от сил трения в опорах промежуточного звена 1, смонтированного на ведущем и ведомом валах, воспринимается гибким уплотнительным элементом (металлическим сильфоном или резиновой мембраной), нагружая его касательными напряжениями, величина которых обратно пропорциональна эксцентриситету e . В свою очередь эксцентриситет e должен быть весьма малым с целью ограничения деформации гибкого уплотнительного элемента. Указанные причины ограничивают область применения ввода вращения подобной конструкции, допуская его использование лишь в случае относительно малых крутящих моментов сопротивления на ведомом валу 3.

Вводы движения с использованием *волновой* передачи позволяют передавать в вакуумный сосуд большие крутящие моменты.

Ввод движения с волновой зубчатой передачей (схема 6 табл. 15.4) состоит из жесткого колеса 1, тонкостенного зубчатого колеса 2, являющегося одновременно герметизирующим элементом, и генератора деформации 3.

Шаг зубчатых колес 1 и 2 сделан одинаковым, а число зубьев — разным. Генератор 3 при своем вращении упруго деформирует тонкостенное колесо 2 таким обра-

зом, что в зоне большей оси эллипса зубья колес находятся в зацеплении, а в зоне малой оси между их вершинами создается гарантированный зазор. В промежуточных положениях зубья между большой и малой осями находятся в неполном зацеплении. Общее количество зубьев, находящихся в контакте и передающих нагрузку, зависит от формы генератора деформации 3 и профиля зубьев.

При вращении генератора 3 волнообразно деформируется тонкостенное колесо 2 и зона зацепления будет перемещаться. Так как тонкостенное колесо 2 неподвижно, то начнет вращаться жесткое колесо 1, при этом передаточное число ввода

$$i = \frac{z_1}{z_1 - z_2},$$

где z_1 — число зубьев на жестком колесе 1 с внутренним зацеплением;

z_2 — число зубьев на тонкостенном колесе 2 с внешним зацеплением.

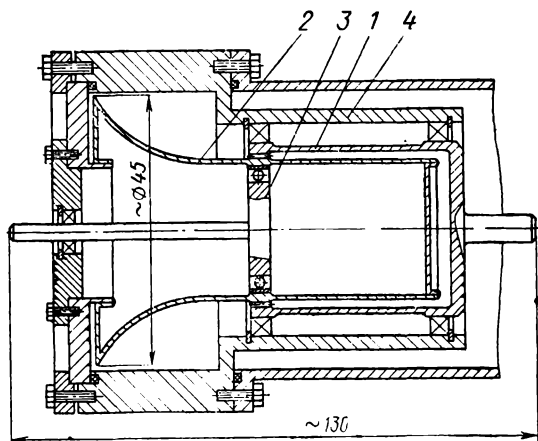


Рис. 15.2. Ввод вращения с использованием волновой зубчатой передачи.

1 — жесткое колесо; 2 — тонкостенное зубчатое колесо; 3 — генератор деформации; 4 — корпус.

Разность чисел зубьев колес 1 и 2 обычно делают равной числу волн деформации. В данном случае генератор 3 создает одновременно две волны деформации по большой оси, и разность чисел зубьев будет равна 2.

Необходимо отметить, что волновая передача может работать как в режиме *редуктора* с очень большим передаточным отношением, так и в режиме *мультипликатора*. Благодаря тому, что в зацеплении одновременно участвует большое количество зубьев, передача обладает высокой кинематической жесткостью при практическом отсутствии люфтов между зубчатыми колесами.

На рис. 15.2 показана конструкция ввода, выполненного по схеме 6 табл. 15.4. При габаритных размерах, указанных на рисунке, ввод обеспечивает передачу момента до 0,024 Н·м с передаточным числом $i=72$.

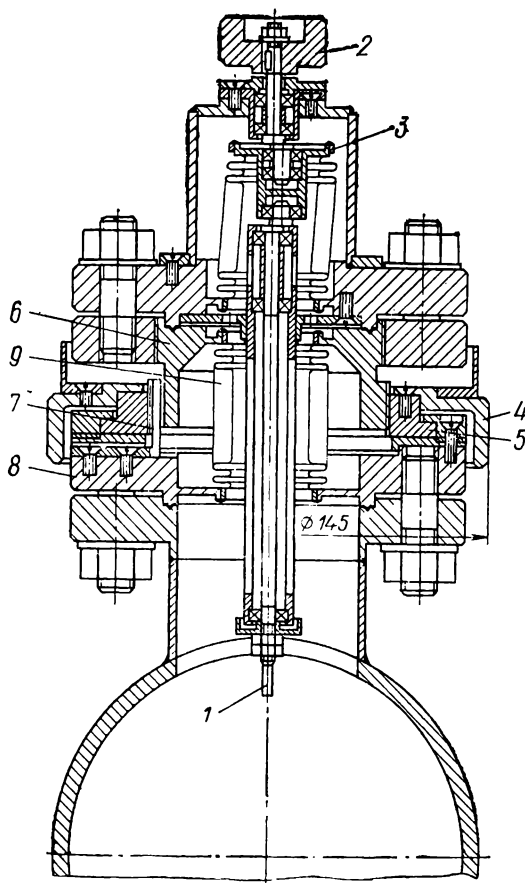


Рис. 15.3. Комбинированный ввод поступательного и вращательного движений.

Вводы движения с неподвижным уплотнением

Номер схемы	Наименование ввода движе- ния	Схема конструкции	Диапазон ра- бочих давле- ний, Па
1	Ввод поступательного движения с постоян- ным магнитом		До 10^{-9}
2	Ввод поступательного движения с электро- магнитом		То же
3	Ввод качательного дви- жения с электромаг- нитом		То же
4	Ввод вращения с посто- янным магнитом		То же
5	Ввод вращения с вра- щающимся магнитным полем		$1-10^{-6}$

тальным элементом (с магнитным приводом)

Максимальная температура прогрева, К	Частота вращения n , об/мин	Кинематическая жесткость	Максимальный передаваемый момент, Н·м
750—1000	—	Нежесткая связь	—
600—1000	—	То же	—
600—1000	Угол поворота до 15°	То же	—
600—800	$n_{\text{макс}}=500 \div 700$	То же	1—1,5
450	$n_{\text{макс}}=3000$	То же	—

Для ввода в вакуумный сосуд сложных движений нашли применение комбинированные вводы. Одна из конструкций для ввода поступательного и вращательного движения показана на рис. 15.3, в которой используются элементы по схемам 1, 5 табл. 15.4. Вращение вала 1 передается от ведущего маховика 2 с помощью промежуточного звена 3, совершающего плоскопараллельное движение (см. схему 5 табл. 15.4). Поступательное перемещение вала 1 осуществляется при вращении маховика 4 и связанной с ним гайки 5. При этом начинает поступательно перемещаться корпус 6, который образует с гайкой 5 резьбовую пару. Вращение корпуса 6 предотвращается шпонкой 7, закрепленной на неподвижном фланце 8. Герметизация ввода поступательного движения достигается металлическим кольцом 9 (см. схему 1 табл. 15.4).

В вводах движения с *неподвижным* уплотнительным элементом усилие на ведомое звено передается с помощью магнитного поля, и движущееся звено не имеет непосредственного контакта со стенкой корпуса.

Некоторые схемы вводов с магнитным приводом приведены в табл. 15.5. Герметичность таких устройств высока.

Следует, однако, учитывать, что с увеличением момента сопротивления на ведомом звене вводов с магнитным приводом возрастает сдвиг ведомого звена относительно ведущего (т. е. передача кинематически нежесткая), а максимальный момент обычно невелик. Поэтому такие вводы движения чаще всего используют при больших частотах и малых нагрузках.

В конструкции устройства по схеме 1 табл. 15.5 при перемещении наружного постоянного магнита 1 перемещается якорь 2, отделенный от магнита тонкостенным стаканом из немагнитного материала.

В конструкции устройства по схеме 2 табл. 15.5 в отличие от схемы 1 табл. 15.5 для тех же целей применен электромагнит.

В устройстве по схеме 3 табл. 15.5 также используется электромагнит для создания качательного движения якоря.

В устройстве, выполненном по схеме 4 табл. 15.5, для передачи вращения использован постоянный магнит 1. На ведомом валу укреплен якорь 2, который отделен от магнита 1 герметизирующим стаканом, выпол-

ненным из немагнитного материала. На полюсах якоря и магнита сделаны канавки, перераспределяющие магнитный поток с целью его концентрации. Магниты изготавливаются из никель-кобальтовых сплавов с направленной кристаллизацией.

В тех случаях, когда в откачиваемый сосуд необходимо ввести вращение с частотой, равной или близкой частоте вращения асинхронных двигателей промышленной частоты, целесообразно применять конструкцию, выполненную по схеме 5 табл. 15.5. В этой конструкции в качестве ведомого звена используется короткозамкнутый ротор 1 обычного асинхронного двигателя. Цилиндрическую часть ротора протачивают на 0,5—0,7 мм на сторону, с тем чтобы разместить между ротором и статором 3 вакуумно-плотную немагнитную перегородку 2.

15.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ ВВОДЫ

Для введения электрической энергии внутрь откачиваемого сосуда обычно используют электрические вводы, которые герметично присоединяются к сосуду и электрически изолируются от него.

В зависимости от рабочего напряжения, силы тока, частоты, допустимой рабочей температуры и других условий эксплуатации электрические вводы могут быть подразделены на три основные группы: *низковольтные, низкочастотные, высоковольтные низкочастотные и высокочастотные.*

В свою очередь вводы каждой группы могут быть разборными и неразборными, прогреваемыми и непрогреваемыми.

Площадь поперечного сечения электрического ввода выбирается такой, чтобы плотность тока для меди не превышала $(3-5) \cdot 10^6$ А/м², для углеродистой стали — $7 \cdot 10^5$ А/м², для алюминия — $2 \cdot 10^6$ А/м², для никеля — $8 \cdot 10^5$ А/м², для молибдена — $1,5 \cdot 10^6$ А/м² и для нержавеющей стали 12Х18Н10Т — $1 \cdot 10^5$ А/м².

Низковольтные вакуумные вводы (до 250 В) в свою очередь делятся на *сильноточные* и *слаботочные*. *Сильноточные вводы* служат в основном для подвода электроэнергии к нагревательным элементам, расположенным внутри откачиваемого сосуда. Для исключения нагрева свыше допустимой температуры *сильноточные вводы* охлаждаются водой. Практически

вводы, предназначенные для пропускания тока свыше 100 А, должны иметь водяное охлаждение. Стенка откачиваемого сосуда, граничащая с вводом, предназначенным для пропускания переменного тока, также должна охлаждаться водой, так как в ней выделяется значительное количество тепла. Плотность тока в месте контакта токоподвода и ввода, изготовленных из меди, должна быть не более $2 \cdot 10^6$ А/м², а в случае, если токоподвод тоже охлаждается водой, допустимая плотность тока может быть увеличена до $5 \cdot 10^6$ А/м².

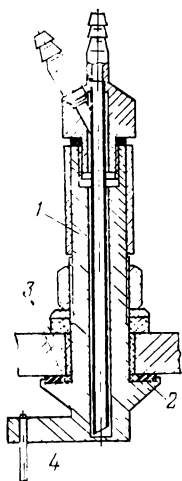


Рис. 15.4. Сильноточный вакуумный ввод.

1 — медный стержень; 2 — резиновый уплотнитель; 3 — изолирующие кольца; 4 — нагреватель.

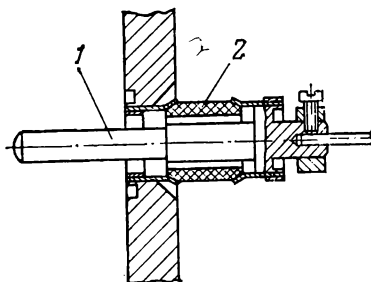


Рис. 15.5. Вакуумный токоввод для прогреваемых систем.

1 — стержень; 2 — керамический изолятор.

Следует отметить, что при одинаковых расчетных площадях поверхности контакта фактическая плотность тока будет разной в зависимости от чистоты обработки контактирующих поверхностей, степени их загрязнения и удельного давления в месте контакта.

На рис. 15.4 изображен сильноточный ввод, применяемый в вакуумных системах с давлением не ниже $5 \cdot 10^{-5}$ Па. Вакуумные вводы, используемые в системах с давлением ниже $5 \cdot 10^{-5}$ Па, должны уплотняться с откачиваемым сосудом через металлический уплотнитель. Изолирующие элементы этих вводов изготавливаются из керамики или стекла, что позволяет при необходимости прогреть вводы с целью их обезгаживания.

На рис. 15.5 приведен прогреваемый ввод простейшей конструкции, пригодный для использования в системах высокого и сверхвысокого вакуума.

Высоковольтные вакуумные вводы применяются при напряжениях свыше 250 В, а также при необходимости исключить электрические утечки в измерительных цепях. Вакуумный ввод с малыми электрическими утечками лучше всего изготовлять с использованием керамических изоляторов, как показано на рис. 15.5. При напряжениях больше 1500 В керамический изолятор делается ребристым для увеличения протяженности изолирующей поверхности.

Высокочастотные вакуумные вводы чаще всего применяются для подвода тока высокой частоты (свыше 1500 Гц) от высокочастотного генератора к индуктору, помещенному в откачиваемом сосуде. Высокочастотные вводы для уменьшения потерь высокочастотной энергии, как правило, выполняются коаксиальными и охлаждаются водой.

15.4. СМОТРОВЫЕ СИСТЕМЫ

Для визуального наблюдения и контроля технологических процессов, осуществляемых в откачиваемых сосудах, обычно используют смотровые системы трех основных типов: *смотровые окна, оптические и телевизионные устройства.*

Смотровые окна с резиновым уплотнителем (рис. 15.6) широко применяются при давлениях не ниже $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Полированный стеклянный диск 5 с помощью нажимного кольца 1 через мягкую прокладку 2 прижимается к резиновому уплотнителю 3. Толщина h стеклянного диска в зависимости от диаметра свободной поверхности диска D выбирается в пределах $h = (0,1 + 0,2)D$, причем для больших диаметров берется относительно меньшая толщина.

Для предохранения внутренней поверхности стеклянного диска от загрязнения продуктами испарения материала иногда ставится защитное стекло 4, которое периодически заменяется. В некоторых конструкциях, особенно связанных с интенсивным испарением материала

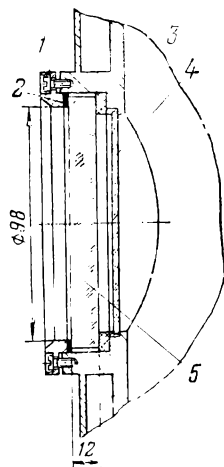


Рис. 15.6. Смотровое окно с резиновым уплотнителем.

или тепловым излучением, применяют защитные металлические заслонки, отводимые на короткие промежутки времени. В конструкциях с поворотными дисками с набором защитных стекол и светофильтров применяются специальные механические щетки, которые очищают защитные стекла и светофильтры от загрязнений.

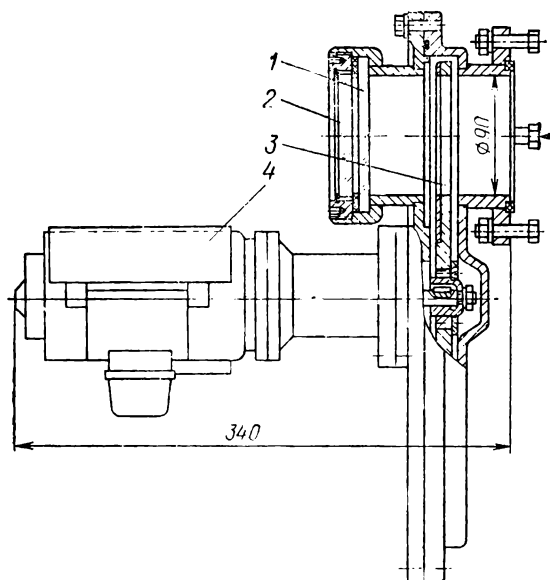


Рис. 15.7. Смотровое окно с вращающимся защитным диском.

1 — иллюминаторное стекло; 2 — свинцовое стекло для защиты от рентгеновских лучей; 3 — вращающийся диск со щелями, 4 — электродвигатель привода вращения диска.

В конструкции, показанной на рис. 15.7, стекло 1 смотрового окна защищено непрозрачным диском 3 с узкими радиальными щелями. При частоте вращения защитного диска более 1500 об/мин большинство частиц осаждается на диске или боковых стенках щели. В некоторых конструкциях (рис. 15.8) защита смотрового окна достигается с помощью прозрачной полиэтилентерефталатной пленки 5 толщиной 20—30 мкм, прижатой к теплоотводящему экрану 3. По мере загрязнения пленка перематывается барабаном 4 с подающей катушки на приемную.

В высоковакуумных установках для электронно-лучевой сварки, нанесения тонких пленок нашли применение перископы, одна из конструкций которых показана на рис. 15.9.

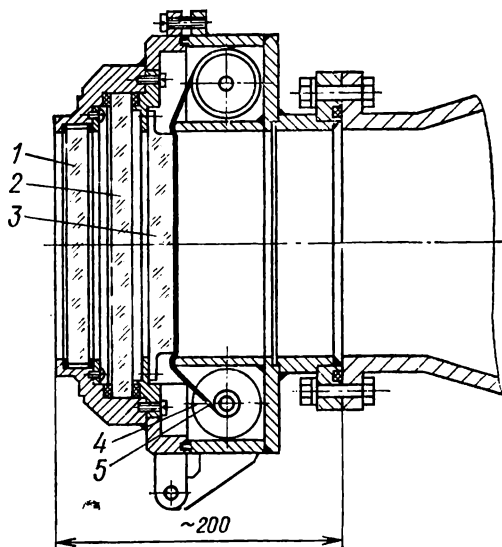


Рис. 15.8. Смотровое окно с защитной прозрачной пленкой.

1 — свинцовое стекло; 2 — иллюминаторное стекло; 3 — тепловой экран; 4 — перематывающий барабан; 5 — прозрачная защитная пленка.

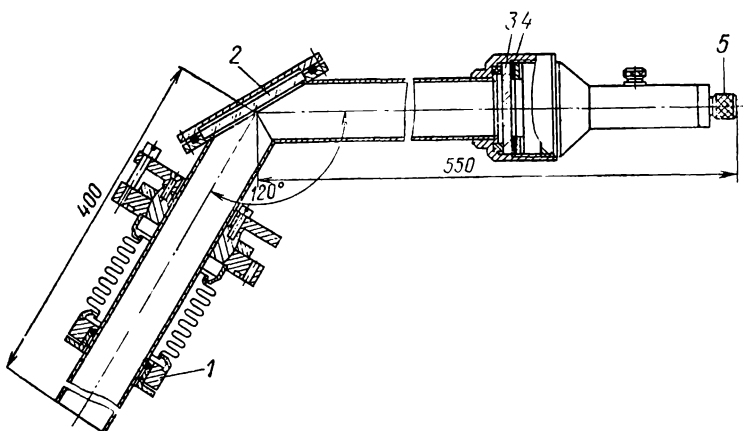


Рис. 15.9. Смотровая система с перископом.

1 — узел герметизации и поворота световода; 2 — отражающее зеркало; 3 — объектив; 4 — герметизирующий узел; 5 — окуляр

Для увеличения обзора световод устройства может поворачиваться относительно неподвижного фланца на угол $\pm 15^\circ$ в любом направлении. Попадание испаряемого вещества на внутреннее зеркало перископа не затрудняет наблюдения, так как отражательные свойства зеркала при этом меняются незначительно.

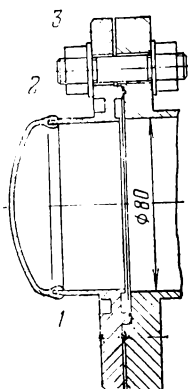


Рис. 15.10. Смотровое окно с металлическим уплотнителем.

В установках со сверхвысоким вакуумом употребляются смотровые окна с металлическим уплотнителем, как показано на рис. 15.10. Стекланный колпак 1 припаян к коваровому стакану 2, сваренному в свою очередь с фланцем 3 из нержавеющей стали. Фланец уплотняется с вакуумным сосудом через металлический уплотнитель. Для предохранения от разрушения стекла с металлом при затяжке металлического уплотнителя необходимо предусматривать деформируемые компенсирующие пояса подобно тем, которые используются во фланцевом уплотнении (см. схему 1 табл. 15.2). Смотровые окна описанной конструкции допускают прогрев до 600—750 К.

15.5. ОТКАЧНЫЕ ГНЕЗДА

В лабораторной практике и в производстве многих типов электровакуумных приборов присоединение изделий к вакуумной системе обычно производится путем напаивания стеклянного штенгеля пламенем газовой горелки. Несколько выше места напайки изделия на стеклянном откачном штенгеле заранее делается суженный участок, так называемая *перетяжка*, которая предназначена для последующей отпайки прибора (рис. 15.11). Внутренний диаметр перетяжки обычно равен $d = (0,1 + 0,6)D$. Поэтому перетяжка резко снижает эффективную скорость откачки изделия.

В серийном и массовом производстве для присоединения изделий к вакуумным системам применяют откачные гнезда разнообразных конструкций.

На рис. 15.12 представлено откачное гнездо карусельного полуавтомата откачки электронно-лучевых

трубок с резиновым уплотнителем и ручным винтовым зажимом. Подобные гнезда применяют и при откачке ряда других приборов. При вращении рукоятки 1 резбовой стакан 6 через подшипник 8 и шайбу 7 нажимает на резиновую муфту 4, которая плотно обжимает стеклянный штенгель изделия.

Корпус гнезда 3 имеет кольцевую полость, ограниченную с внешней стороны стаканом 5. В эту полость может подаваться вода для охлаждения резиновой муфты.

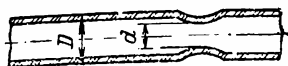


Рис. 15.11. Стеклянный откачной штенгель с «перетяжкой».

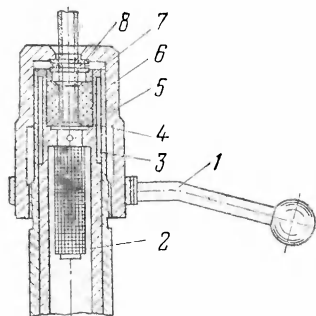


Рис. 15.12. Откачное гнездо с ручным винтовым зажимом.

ты во время откачки и обезгаживания изделия. Предохранительная сетка 2 защищает вакуумную систему от осколков стекла при поломке штенгеля.

Применение откачных гнезд хотя и позволяет осуществить быстрое присоединение обрабатываемого прибора к вакуумной системе, вовсе не исключает перетяжку и использование газовой горелки или электрического нагревателя для отпая прибора после откачки.

При отпае изделия из стекла штенгеля выделяются различные газы и пары (пары воды, двуокись углерода, метан), часть которых попадает в полость прибора, который отпаивают, и повышает в нем давление.

Поэтому при сочленении изделий с современными высоковакуумными системами с большой быстротой откачки нашли широкое применение металлические штенгели (рис. 15.13), чаще всего медные. Один из вариантов сочленения металлического штенгеля с вакуумной системой показан на рис. 15.14.

Развальцованный медный штенгель 1 с предварительно надетым ниппелем 5 впаивается в корпус изделия твердым припоем. Рычаг 2 с осью 3, на который воздействуют болтом 4, упирающимся в корпус 7, через ниппель 5 прижимает развальцованный конец штенгеля

к полированной поверхности головки 6. При прогреве изделия во время его откачки рычаг 2 выполняет роль упругого элемента, компенсирующего разность линейных удлинений деталей откачного гнезда, за счет чего повышается надежность уплотнения штенгеля.

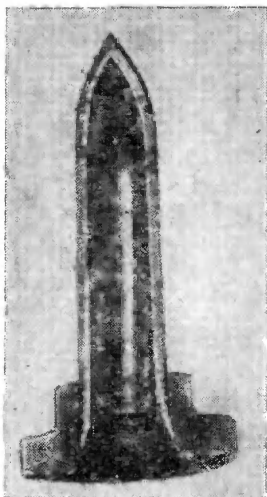


Рис. 15.13. Разрез металлического штенгеля с ниппелем после снятия изделия методом холодной сварки.

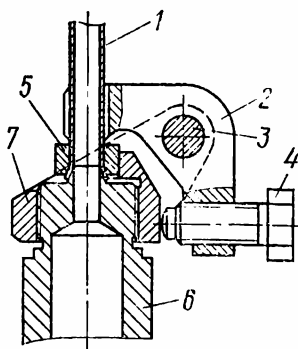
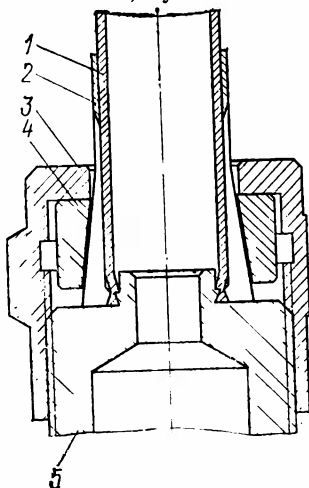


Рис. 15.14. Сочленение металлического штенгеля с откачным гнездом с помощью рычага.

В конструкции откачного гнезда, показанного на рис. 15.15, уплотнение штенгеля осуществляется по



принципу, близкому к схеме 5 табл. 15.2 (см. § 15.1). Так же как в предыдущем случае, металлический штенгель 1 впаивается в изделие твердым припоем, но без заранее одетого ниппеля. Для уплотнения штенгеля с головкой 5 откачного гнезда вращают гайку 3, которая через ниппель 4 воздействует на разрезную цангу 2.

Рис. 15.15. Сочленение не развальцованного металлического штенгеля с откачным гнездом.

Цанга сжимается до тех пор, пока торцом не упрется в головку 5, при этом продольные разрезы цанги почти смыкаются, а штенгель уплотняется. Выгодным отличием этой конструкции от откачного гнезда, показанного на рис. 15.14, является возможность многократного уплотнения с меньшим усилием прямого штенгеля без развальцовки и ниппеля. Конструкция откачного гнезда позволяет осуществлять прогрев до 750 К.

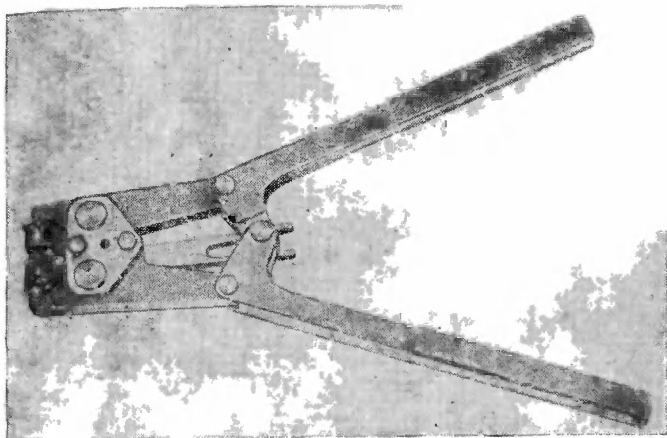


Рис. 15.16. Ручные клещи (пережим) для холодной сварки металлических штенгелей.

Для штенгелей с внутренним диаметром больше 15 мм обычно применяют фланцевые уплотнения, работающие по одной из схем табл 15.2.

Отделение изделий от вакуумной системы осуществляется методом холодной сварки металлического штенгеля с одновременной его отрезкой.

На рис. 15.13 представлен разрез металлического штенгеля после снятия изделия. Сущность холодной сварки заключается в том, что при достаточном сближении поверхностей соединяемых металлов между атомами образуется так называемая металлическая связь, возникающая в результате обобществления валентных электронов, вследствие чего создается единая кристаллическая решетка.

Вакуумно-плотная холодная сварка медных штенгелей осуществляется при деформации стенок на 80—85% первоначальной толщины. Удельные давления на материал составляют $(60—90) \cdot 10^7$ Па для меди и $(20—30) \cdot 10^7$ Па для алюминия. Надежная сварка обеспечивается только при достаточно чистых свариваемых поверхностях. Наличие пленок масла и иных загрязнений недопустимо, так как пленки (особенно жировые) не



Рис. 15.17. Пережим с электромеханическим приводом.

1 — пуансоны; 2 — волновой зубчатый редуктор; 3 — электродвигатель

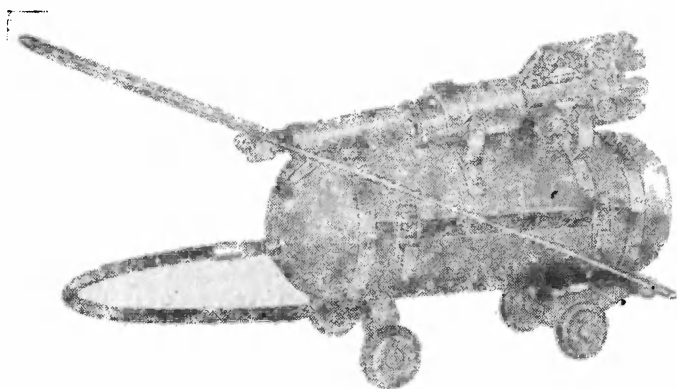


Рис. 15.18. Пережим с гидравлическим приводом.

разрушаются даже при очень больших давлениях и препятствуют сварке.

Металлические штангели обычно изготавливаются из холоднотянутых медных или алюминиевых труб с наружным диаметром до 45 мм и толщиной стенок не менее 0,75 мм, так как при меньшей толщине стенок нельзя обеспечить достаточную механическую прочность места отделения штангеля.

Отделение изделий методом холодной сварки с диаметрами штангелей до 15 мм может производиться ручными клещами (пережимом), показанными на (рис. 15.16, 15.17) или пережимом с гидравлическим приводом (рис. 15.18).

Глава шестнадцатая

КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА

16.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ

Коммутационная аппаратура (краны, затворы, клапаны, золотники, натекатели) является одним из важнейших элементов вакуумных систем.

Особенности конструкций вакуумной коммутационной аппаратуры вытекают из специфических требований, резко отличающихся от требований, предъявляемых к аппаратуре того же назначения, применяемой в газовых, пневматических и гидравлических системах. К таким специфическим требованиям относятся:

1. *Высокая герметичность.* Особо жесткие требования по герметичности предъявляются к аппаратуре, применяемой в системах высокого и сверхвысокого вакуума. Высокая герметичность коммутационной аппаратуры должна быть обеспечена не только по отношению к внешней среде, но и между седлом (корпусом) и запирающим элементом (клапаном) в закрытом положении.

2. *Максимальная проводимость в открытом положении.* Для аппаратуры, работающей при молекулярном режиме течения газа, это требование лучше всего обеспечивается созданием прямоточных конструкций, оказывающих наименьшее сопротивление потоку откачиваемого газа. Так, угловой кран с диаметром условного

прохода 80 мм имеет проводимость около 190 л/с, а прямооточный затвор с тем же условным проходом — 756 л/с.

3. *Минимальное газовыделение внутренних поверхностей аппаратуры.* Необходимо исключить применение смазок и уплотнителей с высокой упругостью паров. Конструкция аппаратуры должна быть разборной и не должна иметь недоступных для промывки мест и труднооткачиваемых карманов.

4. *Незначительная адсорбция газов внутренними поверхностями аппаратуры.* Аппаратура должна быть защищена от коррозии или должна изготавливаться из некорродирующих металлов.

5. Аппаратура, предназначенная для работы в системах сверхвысокого вакуума, должна допускать с целью ее обезгаживания *возможность многократного прогрева до температуры 600—1000 К.*

6. Для работы в автоматизированных вакуумных системах коммутационная аппаратура должна *иметь устройство для дистанционного управления с сигнализацией состояния аппаратуры (открыто — закрыто).*

7. Аппаратура должна иметь *гарантированное число рабочих циклов (открытий — закрытий) не менее 25 000.*

16.2. КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ НЕПРОГРЕВАЕМЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Наиболее распространенные схемы аппаратуры с *ручным управлением* приведены в табл. 16.1.

В лабораторных вакуумных системах нашли широкое применение стеклянные пробковые краны различных конструкций (проходные, угловые, многоходовые, порционные), выполненные по схеме 1 табл. 16.1. В промышленных установках стеклянные краны почти не применяются из-за малой механической прочности и трудности автоматизации.

В неавтоматизированных промышленных установках весьма часто используются краны золотникового типа, выполненные по схеме 2 табл. 16.1. Краны этого типа позволяют совместить в одном корпусе несколько коммутирующих элементов и исключить ошибки оператора, возникающие при неправильной последовательности включения соответствующих коммутирующих устройств.

В кранах с винтовым приводом, выполненных по схеме 3 табл. 16.1, давление тарелки на седло определяется усилием, прикладываемым оператором, что часто приводит к преждевременному выходу из строя уплотнителя. Недостатком существующих кранов является и то, что отсутствуют указатели открытого и закрытого положения.

На рис. 16.1 изображен кран с подвижным сильфонным уплотнением штока, выполненным по схеме 3 табл. 16.1. Для удобства сборки привод крана с подвижным сильфонным уплотнением смонтирован на фланце 3 и представляет собой съемный узел.

На рис. 16.2 изображен кран с ручным эксцентриковым приводом (схема 4 табл. 16.1). Усилие уплотнения клапана создается эксцентриком 1, перемещение по вертикали которого ограничивается направляющей (кинематическое замыкание). Кинематическое замыкание позволяет исключить пружину и обеспечивает герметичность при наличии давления с любой стороны тарелки клапана. Положение рукоятки 2 указывает на состояние клапана (открыт — закрыт).

В автоматизированных откачных системах применяется коммутационная аппаратура с дистанционным управлением. Дистанционное управление позволяет производить более рациональную компоновку вакуумных систем и осуществлять блокировки и программирование.

В табл. 16.2 приведены наиболее распространенные схемы коммутационной аппаратуры с дистанционным управлением для непрогреваемых вакуумных систем.

В ряде автоматизированных вакуумных установок получили распространение клапаны с пневматическим или гидравлическим приводами, выполненными по ссхе-

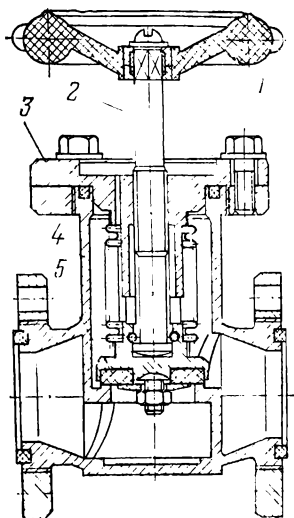
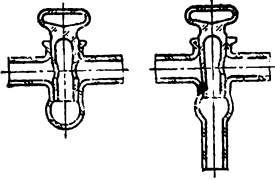
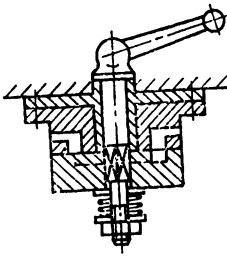
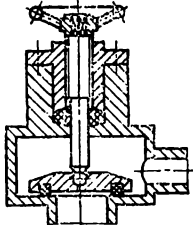
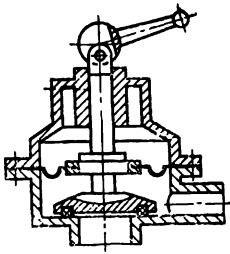


Рис. 16.1. Вакуумный кран с ручным винтовым приводом.

1 — маховик; 2 — винт; 3 — фланец; 4 — корпус; 5 — резиновый уплотнитель.

Коммутационная аппаратура с ручным управле

Номер схемы	Наименование	Схема	Диаметр условного прохода ДУ, мм
1	Пробковые краны		6—35
2	Краны золот- никового типа		—
3	Краны с вин- товым приво- дом		10—100
4	Краны с экс- центриковым приводом		10—100

нием для непрогреваемых вакуумных систем

Область применения	Уплотнение подвижного элемента	Примечания
Стекланные ваку- умные системы с дав- лением p больше 10^{-3} Па	Герметичность обе- спечивается с по- мощью вакуумной смазки	Применяются в стекланных вакуум- ных системах
Металлические ва- куумные системы с давлением p больше 10^{-3} Па вместо бло- ков клапанов для от- качки и наполнения газом	Герметичность обе- спечивается за счет притирки поверхно- стей и применения вакуумной смазки	Имеют положения, соответствующие раз- личным этапам от- качки и наполнения газом
а) Металлические вакуумные системы с давлением p больше $1 \cdot 10^{-4}$ Па; б) металлические вакуумные системы с давлением p больше $1 \cdot 10^{-5}$ Па	а) Сальниковое уп- лотнение штока, вы- полненное по схемам 1, 2 табл. 15.3 б) Сильфонное уп- лотнение штока, вы- полненное по схеме 1 табл. 15.4	Вместо резьбы ча- сто применяют бай- онетное соединение штока с корпусом
То же	То же	Давление тарелки крана на седло опре- деляется усилием пружины (силовое замыкание) или при кинематическом за- мыкании — ходом штока

ме 1 табл. 16.2. Уплотнение резинового клапана в этих конструкциях осуществляется за счет подачи воздуха или жидкости в цилиндр привода клапана, а открытие — под действием пружины или подачи воздуха или жидкости в штоковую полость.

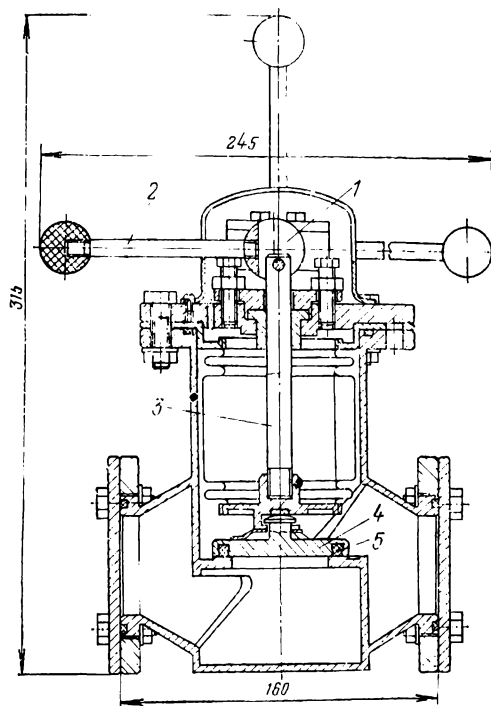


Рис. 16.2. Вакуумный кран с ручным эксцентриковым приводом.

1 — эксцентрик; 2 — рукоятка; 3 — шток; 4 — тарелка клапана; 5 — резиновый уплотнитель.

Электромагнитные клапаны по конструкции сложнее клапанов с пневматическим приводом, но имеют перед ними ряд преимуществ. Клапаны с электромагнитным приводом обладают малым временем срабатывания (около 0,1 с) и поэтому незаменимы в качестве блокировочных элементов. На рис. 16.3 показан угловой клапан с электромагнитным приводом.

Усилие, уплотняющее клапан 6 по седлу, впаиванному в корпус 8, создается пружиной 4, которая воздей-

вует на рычаг 7. Рычаг с клапаном введен внутрь корпуса через резиновую диафрагму 5 и жестко закреплен в скобе 10, которая вращается на шариковых подшипниках, чем достигается разгрузка диафрагмы от усилия уплотнения клапана и воздействия атмосферного давления.

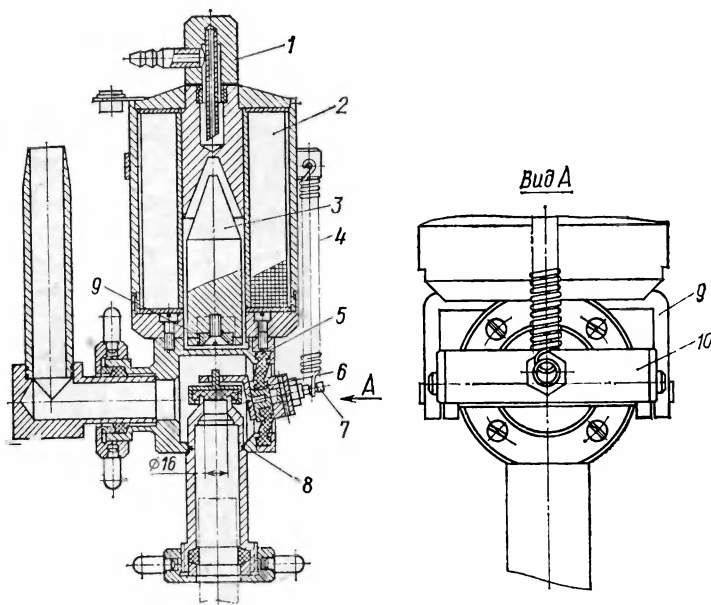


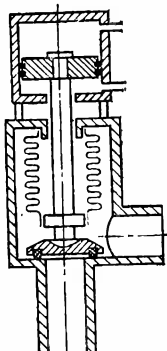
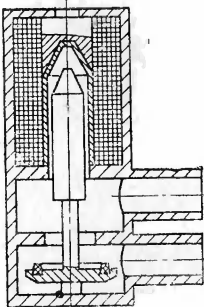
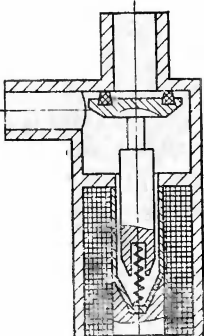
Рис. 16.3. Угловой клапан с электромагнитным приводом.

1 — штуцер водяного охлаждения; 2 — катушка электромагнита; 3 — якорь; 4 — пружина; 5 — резиновая диафрагма; 6 — резиновый уплотнитель (клапан); 7 — рычаг; 8 — корпус; 9, 10 — скобы.

ния. Открытие клапана производится электромагнитом 2, который при подаче на него напряжения 24 — 28 В втягивает якорь 3. С якорем через скобы 9 и 10 связан рычаг 7 с клапаном 6. Повышенная надежность клапана обеспечена тем, что все подвижные элементы (якорь, скобы и т. д.) выведены из его вакуумной полости, а в качестве опор применены шариковые подшипники.

Для перекрытия трубопроводов больших проходных сечений применяют затворы, оказывающие минимальное сопротивление потоку откачиваемых газов (табл. 16.3).

Коммутационная аппаратура с дистанционным управ

Номер схемы	Наименование	Схема	Диаметр услов- ного прохода ДУ, мм
1	Клапан с пнев- матическим или гидравлическим приводом		>50
2	Клапан с элек- тромагнитным при- водом (усилие уп- лотнения обеспечи- вается магнитом)		10—80
3	Клапан с элек- тромагнитным при- водом (усилие уп- лотнения создает- ся пружиной)		10—80

Область применения	Уплотнение подвижного элемента	Примечания
Вакуумные системы с давлением p больше $1 \cdot 10^{-5}$ Па	Уплотнение штока выполнено по схеме 1 табл. 15.4	Обычно применяется совместно с электромагнитным реверсивным золотником
Вакуумные системы с давлением p больше $1 \cdot 10^{-5}$ Па	Уплотнение якоря выполнено по схеме 2 табл. 15.5	Открытие клапана происходит под действием массы якоря. Работают только в одном положении
То же	То же	Может служить предохранительным клапаном. Работает в любом положении

Номер схемы	Наименование	Схема	Диаметр услов- ного прохода Ду, мм
4	Кран с электро- механическим при- водом		25—100

Широкое распространение в отечественной промышленности получили вакуумные затворы, один из которых представлен на рис. 16.4 (схема 1 табл. 16.3).

В открытом положении тарелка 3 расположена вертикально в корпусе 2. При вращении эксцентрикового валика 7 по часовой стрелке тарелка поворачивается на 90° и занимает горизонтальное положение. В это время еще сохраняется небольшой зазор между тарелкой и резиновым уплотнителем 4. При дальнейшем вращении эксцентрикового валика выдавливается фиксатор 8, а рычаг 5 вдвигается в рамку 9. Затем эксцентриковый валик начинает опускать вниз левое плечо рычага 5 и через шарикоподшипник 10 прижимает тарелку к резиновому уплотнителю.

При применении электропривода вращение валика 7 ограничивается концевыми выключателями, а при ручном закрытии — упорами. Открытие затвора осуществляется при вращении эксцентрикового валика против часовой стрелки.

Вал, передающий вращение к эксцентриковому валику, вращается в патрубке, приваренному к корпусу. Уплотнение валика в патрубке осуществляется по схеме 1 табл. 15.3. Ведущий вал связан с эксцентриковым валиком через крестоподвижную муфту.

Область применения	Уплотнение подвижного элемента	Примечание
а) Вакуумные системы с давлением p больше 10^{-3} Па; б) вакуумные системы с давлением p больше 10^{-2} Па; в) вакуумные системы с давлением p меньше 10^{-5} Па	а) Уплотнение штока резиновыми армированными манжетами по схеме 2 табл. 15.3; б) уплотнение штока резиновой диафрагмой; в) уплотнение штока металлическим сильфоном по схеме 1 табл. 15.4	

При применении электропривода вращение от электродвигателя передается ведущему валу через двухступенчатый редуктор с прямозубой и червячной передачами.

Для предохранения механизма от перегрузок предусмотрена фрикционная многодисковая муфта.

В зависимости от компоновки вакуумной системы затвор может быть как угловым, так и прямоточным.

Затвор имеет небольшие габариты в плане при сравнительно большой высоте. К недостаткам затвора следует отнести наличие сальникового уплотнения и значительное время закрытия.

Очень удобны для перекрытия трубопроводов больших сечений затворы, обладающие малыми осевыми размерами и оказывающие незначительное сопротивление потоку откачиваемого газа. Конструкция затвора ДУ-160, выполненная по схеме 2 табл. 16.3, приведена на рис. 16.5.

Тарелка 5 с резиновым уплотнителем 7 перекрывает отверстие затвора, уплотняясь по седлу, сделанному за одно целое с крышкой 10. Тарелка подвешена на четырех серьгах 6 к каретке 4, перемещающейся на шарикоподшипниках 12 в пазах корпуса 9. Движение каретке сообщается кривошипом 3, который также имеет опоры

качения. Уплотнение вала кривошипа 3 осуществляется двумя резиновыми кольцами, пространство между которыми заполняется вакуумным маслом (см. схему 1 табл. 15.3). В крайних положениях затвора кривошип стопорится фиксатором 2, вмонтированным в рукоятку 1. При повороте рукоятки по часовой стрелке каретка перемещается вправо до тех пор, пока тарелка не упрется в крышку. При дальнейшем движении каретки вправо серьги выпрямляются, а тарелка опускается вниз и уплотняет отверстие затвора.

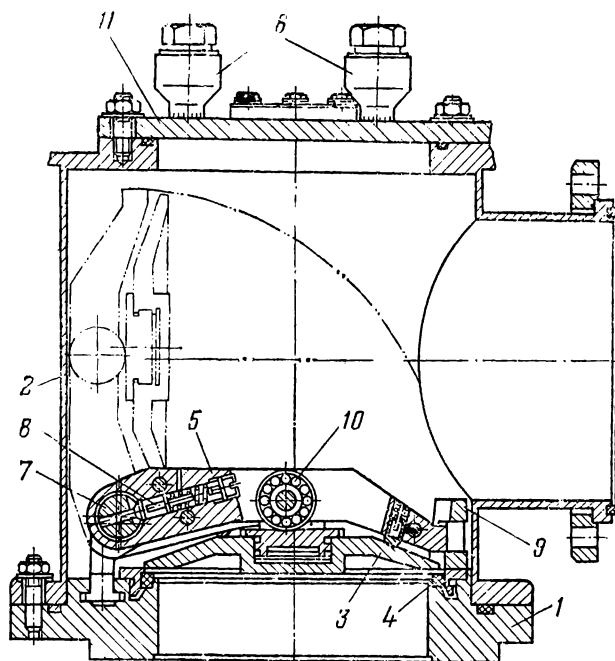
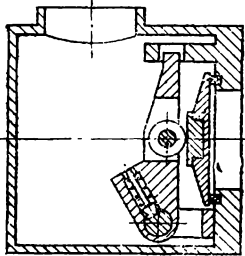
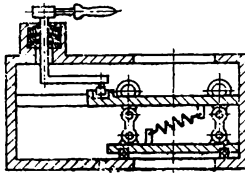


Рис. 16.4. Вакуумный затвор.

1 — фланец; 2 — корпус; 3 — тарелка клапана; 4 — резиновый уплотнитель; 5 — рычаг; 6 — штуцер; 7 — эксцентриковый вал; 8 — фиксатор; 9 — рамка; 10 — шарикоподшипник; 11 — заглушка.

Открытие затвора производится вращением рукоятки 1 против часовой стрелки. При этом в первый момент тарелка двумя пружинами 11 подтягивается вверх и вправо, а затем вместе с кареткой перемещается в карман, образованный крышками 10 и 8 и корпусом 9, полностью открывая проходное сечение затвора.

Затворы для непрогреваемых вакуумных систем

Номер схемы	Наименование	Схема	Диаметр условного прохода ДУ, мм	Область приме- нения	Уплотнение под- вижного элемента	Примечание
1	Затвор с экс- центриковым механизмом уп- лотнения		80—900	В вакуумных системах с дав- лением $p = 10^{-3} \div 10^{-5}$ Па	Уплотнение эксцентрикового валика выпол- нено по схеме 1 табл. 15.3	Имеет руч- ной или элек- тромеханиче- ский привод
2	Затвор с под- веской тарелки на шарнирном параллелограм- ме		80—1200	В вакуумных системах с дав- лением p боль- ше 10^{-4} Па	Уплотнение ввода движе- ния выполнено по схемам 1, 2 табл. 15.3	Имеет ручной или электроме- ханический при- вод

Затвор не разуплотняется под действием атмосферного давления с любой стороны тарелки. Затворы, снабженные электроприводом, могут управляться дистанционно.

Однако существенным недостатком конструкции описанного затвора является наличие в вакуумной полости элементов привода, таких как подшипники, направляющие, рычаги и т. д., а сальниковое уплотнение требует тщательного ухода и частых ревизий.

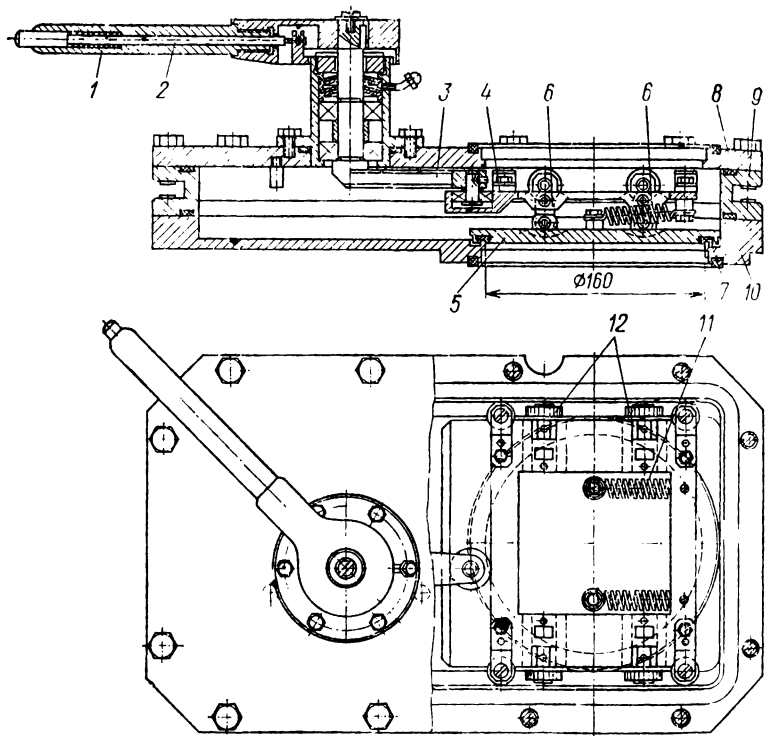


Рис. 16.5. Вакуумный затвор с малыми осевыми размерами.

Коммутационная аппаратура, предназначенная для работы в непрогрываемых вакуумных системах (давление p больше $5 \cdot 10^{-5}$ Па), обычно изготавливается из малоуглеродистой стали (например, стали 20) и подвергается антикоррозионному покрытию — химическому никелированию или лужению.

В качестве уплотнителей в этой аппаратуре применяются чаще всего вакуумную маслостойкую резину, например, марки 9024.

Усилие уплотнения, при котором обеспечивается необходимая герметичность коммутационной аппаратуры, составляет $(10—13) \cdot 10^5$ Па для резиновых уплотнителей прямоугольного сечения и $(6—17) \cdot 10^5$ Па для уплотнителей трапецеидального сечения.

16.3. КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ПРОГРЕВАЕМЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Уплотнение клапанов коммутационной аппаратуры, предназначенной для работы в области сверхвысокого вакуума, может осуществляться как за счет *расплавления и затвердевания металла или сплава* с низкой температурой плавления и низкой упругостью пара при температуре плавления (жидкометаллические уплотнения), так и за счет *деформации металлического или синтетического уплотнителя* с малым газовыделением (например, резины ИРП-2043).

Жидкометаллические уплотнения применяются ограничено из-за большого времени срабатывания аппаратуры, эксплуатационных неудобств, связанных со взаимодействием жидких металлов и сплавов со стенками аппаратуры и атмосферным воздухом, а также из-за неизбежного попадания частиц расплавленного металла в вакуумную систему.

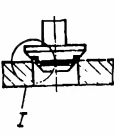
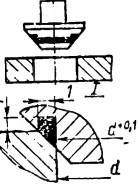
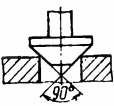
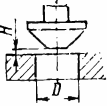
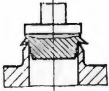
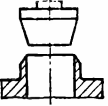
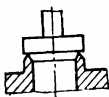
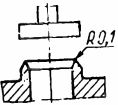
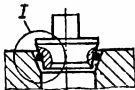
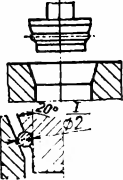
Промежуточное положение между расплавляемыми и деформируемыми уплотнениями занимают уплотнения с использованием *индия и его сплавов*.

Основные схемы уплотнения кранов с использованием *пластических деформаций* приведены в табл. 16.4.

Удельное давление, необходимое для уплотнения крана, выполненного по схеме 1 табл. 16.4, невелико. Приложение чрезмерного усилия может привести к выдавливанию индия из канавки. Поэтому в конструкциях кранов с индиевым уплотнением необходимо предусматривать ограничители усилия закрытия. При обезгаживании прогревом до температуры, превышающей температуру плавления индия, кран необходимо монтировать таким образом, чтобы не происходило вытекания индия, либо прогревать его в закрытом состоянии.

Наибольшее распространение в промышленности получили цельнометаллические прогреваемые краны, в ко-

Схемы уплотнений кранов с использованием пластической деформации

Номер схемы	Схема уплотнения		Диаметр ус- ловного про- хода крана ДУ, мм	Материал уплотнителя	Удельное давление уплотнения, отне- сенное к 1 мм пери- метра уплотнения, Н/мм
	Уплотненное положение	Открытое положение			
1			10—500	Индей	8—10
2			10—250	Медь	400—600
				Алюми- ний	150—200
3			10—150	Медь	47—53
4			10—500	Медь	150
5			10—100	Медь	80—120

торых уплотнение происходит за счет пластической деформации материала тарелки клапана или седла.

В уплотнении, выполненном по схеме 2 табл. 16.4, герметизация осуществляется за счет смятия конуса клапана кромками отверстия корпуса крана. Конус клапана изготавливается из мягкого материала, чаще всего из отожженной меди или алюминия.

Шероховатость уплотняющих кромок седла должна быть не более 0,5 мкм, а конической поверхности клапана — не более 1 мкм. На конической поверхности не допускаются риски, забоины и другие механические дефекты.

С целью уменьшения уплотняющего усилия иногда применяются краны, в которых уплотнение происходит при врезании острых кромок седла корпуса в конус клапана, изготовленного из более мягкого материала (как показано на схеме 3 табл. 16.4). При этом первоначально срезаемая стружка составляет 0,1—0,15 мм. За одно закрытие режущая кромка седла врезается в медный конус всего на несколько микрон, что позволяет производить многократные закрытия крана без смены конуса.

~ Число рабочих циклов кранов с медным клапаном невелико, например, для кранов с уплотнением клапана по схеме 2 табл. 16.4 составляет всего 500—1000 циклов (открытий — закрытий). Такое малое число рабочих циклов обусловлено тем, что в конструкциях цельнометаллических кранов с ручным и электромеханическим приводом трудно обеспечить постоянство усилия на штоке клапана, и поэтому приходится с каждым новым циклом вновь деформировать уплотняющий элемент, что требует приложения постоянно возрастающего усилия.

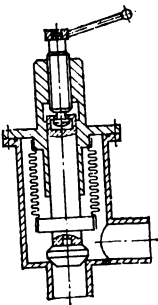
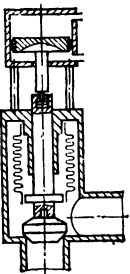
В кранах с уплотнением по схеме 4 табл. 16.4 достигается практически постоянная ширина кольца смятия грибка независимо от точности изготовления и сборки, что обеспечивает уменьшение усилия уплотнения и увеличение более чем на порядок числа рабочих циклов по сравнению со схемой 2 табл. 16.4.

В уплотнении, выполненном по схемам 5 табл. 16.4, герметизирующим элементом является медное кольцо, изготовленное из проволоки. Конструкция уплотнения достаточно проста и надежна. Число рабочих циклов достигает 3000 без замены уплотняющего элемента.

Схемы коммутационной аппаратуры для *прогрева-*

Таблица 16.5

Коммутационная аппаратура для прогреваемых сверхвысоковакуумных систем

Номер схемы	Наименование	Схема	Диаметр услов- ного прохода ДУ, мм	Примечания
1	Кран с винто- вым механиз- мом переме- щения штока		10—200	Имеет ручной или электроме- ханический при- вод
2	Кран с порш- невым приво- дом штока		25—500	Имеет пневма- тический или гидравлический привод

Кран, выполненный по схеме 1 табл. 16.5, представ-
лен на рис. 16.6. Сменный медный клапан 4 крепится
к штоку 3, перемещающемуся во втулке по посадке вто-
рого класса точности. Высокие требования предъявля-
ются к правильности геометрической формы конической
поверхности клапана и кромок седла и их соосности. При
этом достигаются равномерный отпечаток кромок седла
на конической поверхности клапана и, следовательно,
равные удельные давления по всему периметру уплот-
нения. Узел 8 с сифоном 6 уплотняется с корпусом 5
медным уплотнителем 7. Медный уплотнитель затягива-

ется гайками 9. Усилие уплотнения создается винтом 1 и передается на корпус крана через дополнительный фланец и болты 2, что исключает возможность разуплотнения сильфонного узла 8 с корпусом при закрытии крана.

При проходных сечениях более 63 мм для получения

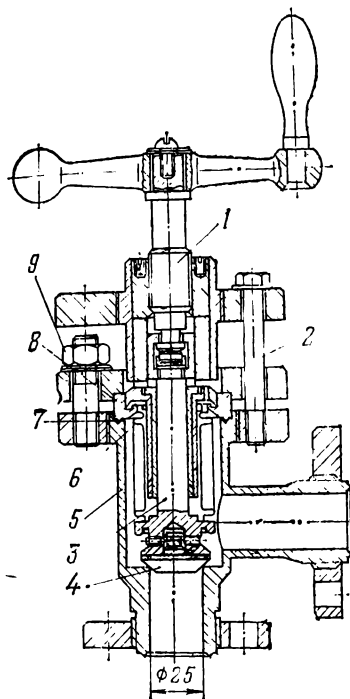


Рис. 16.6. Целикометаллический прогреваемый кран с винтовым механизмом перемещения штока.

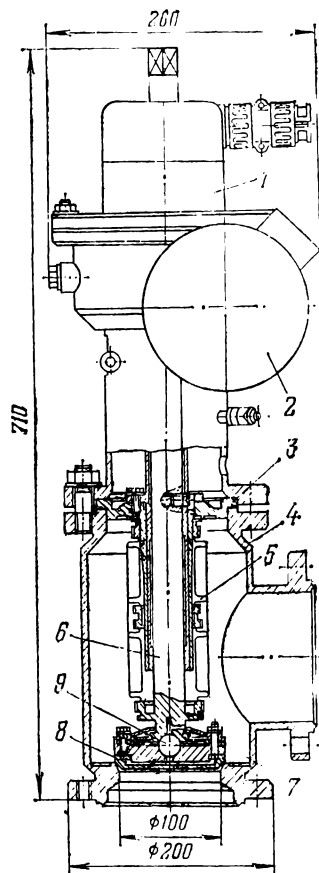


Рис. 16.7. Целикометаллический прогреваемый кран с электромоторным приводом.

надежного уплотнения при многократных срабатываниях тарелку клапана подвешивают на шарнире и гибкой диафрагме. Такая подвеска тарелки применена в конструкции крана с электроприводом, который изображен на рис. 16.7. Диафрагма 7, изготовленная из нержавеющей стали, является гибкой подвеской тарелки клапана 8.

Усилие, развиваемое электродвигателем 2, передается через червячный редуктор 1, винтовую пару и предварительно сжатые тарельчатые пружины (на рисунке не показаны) на шток 6. Тарельчатые пружины обеспечивают сохранение уплотняющего усилия в заданных пределах, несмотря на некоторые неточности в конечном положении системы при остановке электродвигателя и деформацию конической поверхности тарелки.

Предварительный натяг тарельчатых пружин в данной конструкции составляет примерно 20 000 Н. Шток через шарик 9 передает усилие на тарелку клапана и уплотняет ее по острой кромке корпуса 4. Открытое и закрытое положения крана ограничиваются концевыми выключателями. После каждой переборки крана, так же как и в предыдущей конструкции, необходимо проточкой удалить отпечаток седла на конусе тарелки клапана. В этой конструкции крана также требуется обеспечить полное отсутствие забоин и риск на уплотняющих поверхностях и высокую точность сборки (так, несоосность конической поверхности клапана и уплотняющей кромки корпуса допускается не более 0,15 мм). Недостаток конструкции крана состоит в том, что уплотняющее усилие воспринимается теми же шпильками, которые затягивают уплотнитель 3, уплотняющий сильфонный узел 5 с корпусом.

Число рабочих циклов кранов с медным клапаном может быть повышено путем применения пневматического или гидравлического привода (схема 2 табл. 16.4).

Коммутационная аппаратура, предназначенная для работы в сверхвысоковакуумных системах (давление меньше $5 \cdot 10^{-5}$ Па), обычно обезгаживается прогревом в вакууме до температуры 500—900 К.

Для прогрева аппаратуры чаще всего применяют нагревательные элементы в виде спиралей из нихромовой проволоки, которыми обматывается аппаратура. В качестве электрической изоляции используют керамические бусы или чулки из термостойкой стеклоткани.

Все резьбовые элементы (гайки, винты, шпильки) в целях исключения прихватаывания покрываются дисульфидом молибдена или сульфидируются. Корпуса аппаратуры, предназначенной для работы в области сверхвысокого вакуума, как правило, изготавливаются из нержавеющей сталей.

Вакуумные системы современного откачного оборуду-

дования содержат, кроме средств откачки, большое количество коммутирующих элементов и соединительных трубопроводов. Так, например, для откачки изделия на обычном современном посту с помощью пароструйного диффузионного и механического вакуумных насосов необходимо иметь три отдельных вакуумных крана, которые должны открываться и закрываться в определенной последовательности. При этом затруднена взаимная блокировка кранов, а габариты вакуумной системы в целом получаются значительными. Стремление упростить обслуживание и исключить возможные ошибки оператора при работе с кранами приводит к необходимости компоновки коммутирующих элементов в *едином блоке* с жесткой последовательностью переключений. В тех случаях, когда блоки коммутирующих элементов используются в установках и автоматах, предназначенных для откачки электровакуумных приборов через штенгель, *откачное гнездо* (см. § 15.5) также является необходимым элементом блока.

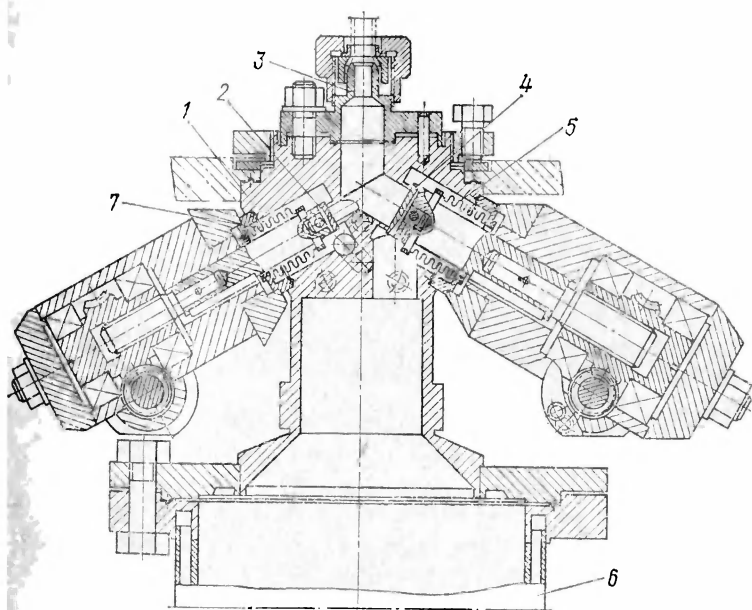


Рис. 16.8. Цельнометаллический прогреваемый блок кранов с откачным гнездом.

1 — корпус блока; 2 — кран форвакуумной откачки; 3 — откачное гнездо; 4 — кран высоковакуумной откачки; 5 — сильфонные узлы; 6 — ионно-геттерный насос.

На рис. 16.8 показана конструкция цельнометаллического блока кранов. На верхнем торце блока кранов укреплено откачное гнездо 3, предназначенное для соединения с металлическим штенгелем электровакуумного прибора. Предварительная откачка прибора производится через кран 2, а высоковакуумная откачка — через кран 4. Краны 2 и 4 имеют одинаковое конструктивное исполнение и отличаются лишь габаритами. Подвижное уплотнение штоков кранов выполнено на металлических сильфонах 5 и 7 (схема 1 табл. 15.4). Краны собираются в виде отдельных узлов, уплотняемых с корпусом 1 через медные уплотнители. Управление кранами осуществляется через червячные передачи, благодаря чему не требуется от оператора приложения чрезмерного усилия.

16.4. УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАПУСКА ГАЗА В ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ (НАТЕКАТЕЛИ)

При работе с газоанализаторами, испытаниях различной вакуумной аппаратуры, а также в ряде других случаев бывает необходимо создавать дозированный поток газа в вакуумный сосуд. Для этого применяют устройства, основные принципиальные схемы которых приведены в табл. 16.6.

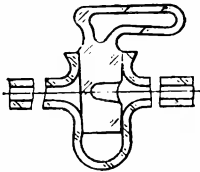
В лабораторной практике и мелкосерийном электровакуумном производстве нашли применение *стеклянные порционные или капиллярные двухходовые краны* (схема 1 табл. 16.6).

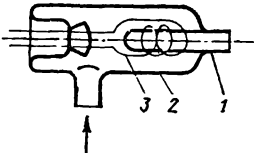
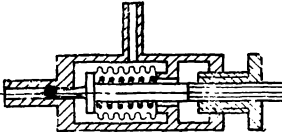
Основными недостатками стеклянных кранов являются их малая надежность, необходимость применения смазки и трудность автоматизации процесса напуска газа.

В устройствах, выполненных по схеме 2 табл. 16.6, применяют либо *пористые материалы* (керамику, металлокерамику, стекла), натекание через которые регулируется перекрытием легкоплавким материалом части поверхности, либо используют *явление диффузии* некоторых газов через материал. Наиболее распространенный гелиевый диффузионный натекатель нашел применение главным образом для калибровки гелиевых масс-спектрометрических теческателей. Принцип действия диффузионного натекателя основан на значительной и постоянной во времени диффузии гелия при комнатной

Таблица 16.6

Устройства для напуска газа в вакуумные системы (натекатели)

Номер схемы	Наименование	Схема	Область применения	Примечания
1	Стекланный двухходовой кран		Наполнение газона- полненных приборов до заданного давления	—
2	Диффузионный натекатель		Калибровка гелиевых масс-спектрометрических течекскаателей. Калиб- ровка датчиков давле- ния, потокомеров	Материал перегородки чаще всего серебро, кварц или материалы с определенной проводи- мостью (пористая кера- мика, стекло и т. п.)

Номер схемы	Наименование	Схема
3	Термодиффузионный на- текатель	
4	Игольчатый на- текатель	

Продолжение табл. 16.6

Область применения	Примечания
Напуск чистых газов в вакуумные системы	Материал перегородки чаще всего серебро, никель, палладий
Напуск любых газов и их смесей в вакуумные системы	Наименьший поток напускаемого газа $1,3 \times 10^{-10} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, наибольший — $7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \times \text{Па/с}$

температуре через кварцевую трубку 2, впаянную в стеклянный баллон 1, заполненный гелием.

Работа *термодиффузионных натекателей* (схема 3 табл. 16.6) основана на повышенной диффузии газов через некоторые материалы при их нагреве. Например, если палладиевую трубку 1, закрытую с одного конца, спаять со стеклянной трубкой 2, то ее можно использовать как фильтр, пропускающий только водород; последний диффундирует через стенки трубки, нагретой нагревателем 3 до температуры выше 750 К.

С этой же целью можно использовать нагретые перегородки из никеля, железа, платины, хотя скорость диффузии водорода через эти материалы меньше, чем через палладий.

Для напуска чистого кислорода обычно используют серебряную трубку, нагреваемую до высокой температуры. Скорость диффузии газов в термодиффузионных натекателях определяется разностью давления и температурой металлической перегородки. Значительными преимуществами диффузионных и термодиффузионных натекателей являются высокая степень чистоты напускаемых газов и возможность автоматизации процесса напуска.

Конструкция *игольчатого натекателя* с ручным управлением по схеме 4 табл. 16.6 приведена на рис. 16.9. Поток газа регулируется погружением тонкой стальной закаленной конической иглы 10 с углом конуса 2° в отверстие медного седла 3. Перемещение иглы в осевом направлении осуществляется вращением гайки 9 с дифференциальной резьбой, люфт в которой выбирается пружиной 5. В качестве подвижного уплотнения иглы применен металлический силь-

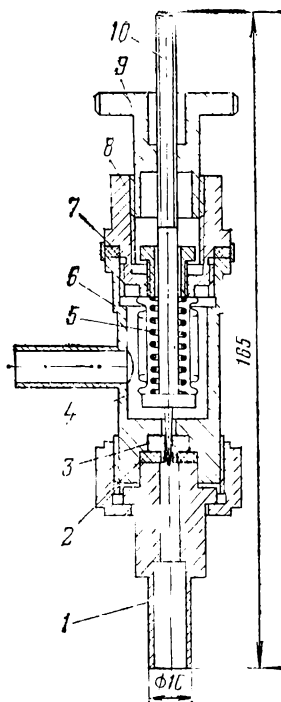


Рис. 16.9. Игольчатый натекатель.

1 — штуцер; 2, 7 — уплотнители; 3 — медное седло; 4 — сильфон; 5 — пружина; 6 — корпус; 8 — втулка; 9 — гайка; 10 — игла.

фон 4. Сильфонный узел уплотняется с корпусом через резиновый уплотнитель 7.

Наименьший поток газа, напускаемый этим натека-телем, составляет $1 \cdot 10^{-10}$ м³·Па/с. Очень тонкое регулирование потока газа, напускаемого в вакуумную систему, можно осуществить путем уменьшения перепада давлений на натекателе. Для этого применяют два последовательно установленных натекателя с промежуточным сосудом. На первом натекателе создается основная часть перепада давлений.

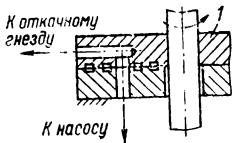
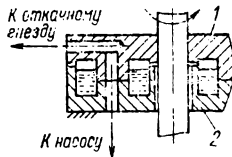
Кроме схем устройств, приведенных в табл. 16.6, часто в вакуумной технике для напуска определенного газа используют так называемые генераторы газа — вещества, легко разлагающиеся при изменении внешних условий. Например, напуск кислорода в сосуд может быть осуществлен при нагреве до 500—550 К марганцовокислого калия, перекиси бария, закиси меди и других богатых кислородом соединений.

16.5. ЗОЛОТНИКИ

Золотник является коммутирующим элементом в карусельных откачных машинах и представляет собой прижатые друг к другу диски с притертыми торцевыми поверхностями. Один из дисков неподвижен, а другой пе-

Таблица 16.7

Схемы золотников карусельных откачных машин

Номер схемы	Наименование	Схема	Область применения
1	Золотник с плоскими дисками и кольцевыми канавками		Карусельные машины для откачки электровакуумных приборов средней мощности
2	Золотник с плоскими дисками и масляным затвором		Карусельные машины для откачки ПУЛ

риодически поворачивается с каруселью откачной машины. На притертых поверхностях дисков золотников имеются отверстия, периодически совмещающиеся при остановке карусели.

Отверстия в подвижном диске соединены с частью вакуумной системы, размещенной на карусели, а отверстия неподвижного диска соединены со стационарной вакуумной системой.

В табл. 16.7 приведены принципиальные схемы наиболее распространенных конструкций золотников.

Диски золотника, изготовленного по схеме 1 табл. 16.7, плоские. Для предотвращения натекания по плоскости разьема золотника применены кольцевые канавки, откачиваемые механическим вакуумным насосом или заполняемые вакуумным маслом.

На рис. 16.10 показан золотник с плоскими дисками 1 и 2 (схема 2 табл. 16.7) с периферийными канавками,

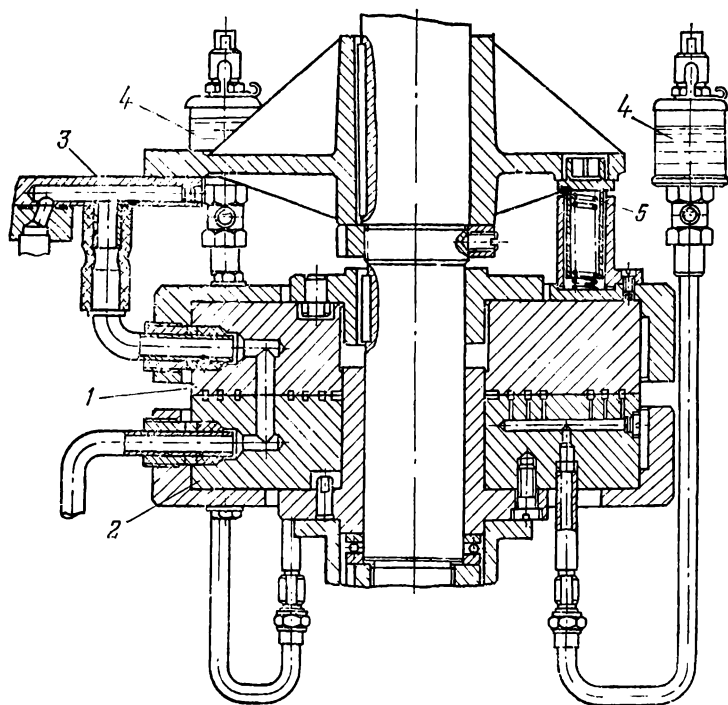


Рис. 16.10. Золотник с плоскими дисками.

1 — подвижный диск; 2 — неподвижный диск; 3 — канал откачного гнезда; 4 — масленка; 5 — пружина.

в которые поступает вакуумное масло из масленки 4. Для более надежного прилегания дисков применены пружины 5. Подвижный диск 1 резиновыми шлангами соединен с каналом 3 откачного гнезда.

Глава семнадцатая

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

17.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ

Требования, которые предъявляются к конструкционным материалам, используемым в вакуумной технике, существенно отличаются от принятых в общем машиностроении и часто вообще не учитываются в иных областях техники.

Рассмотрим основные специфические требования, которым должны удовлетворять материалы, используемые в вакуумной технике.

1. Высокая вакуумная плотность при минимальной толщине материала (см. гл. 4).

2. Низкое давление насыщенных паров материала при рабочей температуре (см. гл. 5).

3. Наименьшее возможное газовыделение в вакууме и легкость обезгаживания (см. гл. 2, 3).

Скорости удельного газовыделения различных материалов при комнатной температуре приведены на рис. 17.1 и 17.2.

Учитывая большое разнообразие конструкционных материалов, используемых в вакуумной технике, ограничимся рассмотрением лишь основных материалов.

17.2. МЕТАЛЛЫ И ИХ СПЛАВЫ

Металлы и их сплавы являются основными конструкционными материалами, из которых изготавливается большинство элементов и узлов современных вакуумных систем.

Малоуглеродистые и углеродистые стали (сталь Ст. 3, сталь 20, сталь 45, сталь 40Х и др.) широко используются для изготовления элементов и узлов вакуумных систем с давлением не ниже $1 \cdot 10^{-4}$ Па. Для исключения коррозии стальные детали, как прави-

до, хромируются или никелируются. Эти материалы, как и другие стали с содержанием никеля меньше 8%, нельзя применять при температурах ниже 223 К из-за повышенной хрупкости при низких температурах.

Нержавеющие стали (сталь 2Х13, 12Х18Н10Т и др.) являются основным материалом, из которого изготавливаются высоковакуумные и сверхвысоковакуумные системы. Эти стали обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошо обезгаживаются прогревом, превосходно свариваются аргонодуговой и электронно-лучевой сварками, паяются мягкими и твердыми припоями и обычно применяются при температуре не выше 1200 К.

Медь (М1, МВ) является основным материалом для изготовления корпусов многих типов электровакуумных приборов, уплотнительных элементов коммутирующей аппаратуры, теплообменников, тоководов и т. п. Медь обладает высокой вакуумной плотностью.

Латунь (Л63, ЛС59-1) в вакуумной технике имеет ограниченное применение из-за летучих примесей, главным образом цинка, который при нагревании латуни в вакууме легко испаряется, в результате чего латунь становится пористой.

Алюминий (АД-1) и его сплавы часто используются для изготовления внутренних элементов пароструйных насосов, а также для уплотнителей в разборных соединениях.

Ковар (железоникелькобальтовый сплав), имеющий температурный коэффициент линейного расширения $(43-53) \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, весьма близкий к коэффициентам линейного расширения некоторых сортов стекла, применяется главным образом для спаев стекла с металлом. Ковар имеет низкую теплопроводность и часто используется для изготовления тепловых развязок.

Вольфрам ($t_{\text{пл}}=3670 \text{ K}$) из всех металлов имеет самую высокую температуру плавления и самое низкое давление паров. Поэтому из вольфрама чаще всего изготавливают нагревательные элементы. Недостатками вольфрама являются его хрупкость и трудность его механической обработки. Наибольшая рабочая температура в вакууме составляет 2800 К.

Молибден ($t_{\text{пл}}=2900 \text{ K}$) менее хрупок, чем вольфрам, и, будучи также тугоплавким материалом, применяется для изготовления нагревателей, тепловых экранов и для деталей спаев с некоторыми сортами стекла.

Наибольшая рабочая температура в вакууме достигает 2000 К.

Никель ($t_{пл}=1725$ К) и некоторые его сплавы часто применяются для изготовления сложных паяных узлов и экранов.

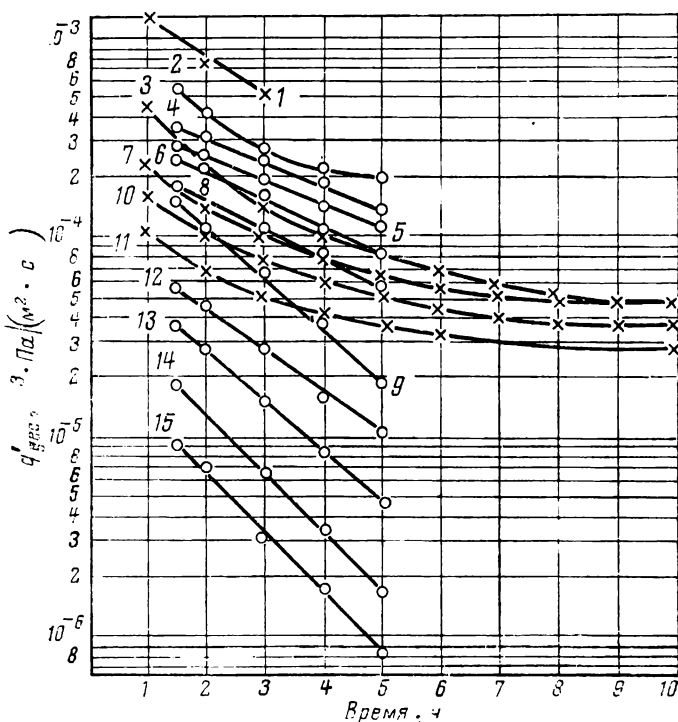


Рис. 17.1. Зависимость скорости удельного газовыделения $q'_{газ}$ различных металлов от времени откачки при комнатной температуре. 1 — алюминий; 2 — дюралюминий необработанный; 3 — мягкая сталь; 4 — дюралюминий, промытый бензолом и ацетоном; 5 — латунь необработанная; 6 — латунь, промытая бензолом и ацетоном; 7 — дюралюминий; 8 — медь необработанная; 9 — нержавеющая сталь необработанная; 10 — латунь; 11 — нержавеющая сталь; 12 — медь, промытая бензолом и ацетоном; 13 — дюралюминий протравленный, промытый бензолом и ацетоном; 14 — латунь протравленная, промытая бензолом и ацетоном; 15 — медь протравленная, промытая бензолом и ацетоном.

Наиболее важные вакуумно-технические характеристики основных металлов, применяемых в вакуумной технике, приведены на рис. 17.1 и в приложениях.

17.3. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

К этой группе материалов относятся главным образом стекло, керамика, резина и некоторые синтетические материалы. Скорости удельного газовыделения из ряда неметаллических материалов показаны на рис. 17.2.

Стекло. Стекло обладает многими положительными свойствами, которые сделали его одним из самых распространенных материалов. Важнейшими свойствами стекла, выгодно отличающими его от других материалов,

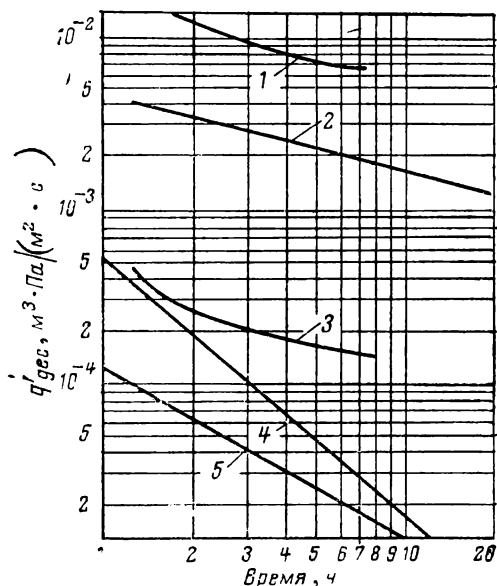


Рис. 17.2. Зависимость скорости удельного газовыделения $q'_{газ}$ некоторых материалов от времени откачки при комнатной температуре.

1 — нейлон; 2 — органическое стекло; 3 — фторопласт; 4 — пиццин; 5 — стеатит.

являются: прозрачность, хорошие электроизолирующие свойства, способность принимать и сохранять сложную форму, простота вакуумно-плотного соединения стеклянных деталей друг с другом и с металлом; стекло в обычных условиях практически непроницаемо для большинства газов (кроме гелия). По температурным коэффициентам линейного расширения (ТКЛР) стекла различных составов образуют две группы.

Легкоплавкие стекла (С90-1, С88-1) имеют ТКЛР $(60-100) \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ и относительно низкую тем-

пературу размягчения 770—850 К. Легкоплавкие стекла применяются главным образом для изготовления ответственных элементов (стеклянных ловушек, колб, плоских ножек и т. п.) и спаиваются с металлами на основе железа.

Тугоплавкие стекла (С39-1, С40-1 и др.) имеют ТКЛР $(34-55) \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ и температуру размягчения 770—1100 К. Эти стекла обладают высокими диэлектрическими свойствами и термостойкостью. Механическая прочность их выше, чем у легкоплавких стекол. Поэтому тугоплавкие стекла применяют для изготовления электрических тоководов, иллюминаторов высоковакуумных систем, ножек электровакуумных приборов и т. п.

По спаиваемости с металлами тугоплавкие стекла делятся на *молибденовые* (С47-46, С49-3) и *вольфрамовые* (С39-1, С40-1 и др.).

Молибденовые стекла хорошо спаиваются с молибденом и коваром. Вольфрамовые стекла отличаются более высокой химической стойкостью и применяются для изготовления ответственных деталей, работающих при высоких температурах.

Кварцевое стекло отличается от обеих групп стекла тугоплавкостью (температура начала размягчения 1520 К) и малым температурным коэффициентом линейного расширения.

Существенным недостатком кварцевого стекла является заметная проницаемость гелия даже при комнатной температуре, причем с ростом температуры проницаемость гелия интенсивно увеличивается.

Керамика. В сверхвысоковакуумных системах и в электровакуумных приборах в качестве изоляторов применяют керамику. Керамические изоляторы механически прочны, обладают высоким электрическим сопротивлением, большой теплостойкостью и способны образовывать вакуумно-плотные соединения с некоторыми металлами и сплавами.

Для изготовления металлокерамических изоляторов чаще всего используют *алюмооксидную* (22ХС, М7), *стеатитовую* (К-1, ЛК-1) или *форстеритовую* (ЛФ-11, КВФ-4) керамику.

Вакуумные резины. Вакуумные резины нашли широкое применение главным образом в качестве уплотнителей в разъемных соединениях и в вакуумных вводах движения.

Таблица 17-1

Физико-механические свойства резин

Показатель	Марки резины				
	7889	9024	51-1578	51-1433	ИРП-1345
Минимальная рабочая температура в вакууме, К	243	240	250	220	240
Максимальная рабочая температура в вакууме, К	350	360	470	470	470
Стойкость по отношению к маслу и бензину	Нестойкая	Маслостойкая	Маслобензостойкая	Маслобензостойкая	Маслобензостойкая
Удельный поток газовой выделения при максимальной рабочей температуре, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$ $7,8 \cdot 10^{-7} *$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
Характеристика продуктов газовой выделения [твердые (ТВ), жидкие (Ж), газообразные (Г)]	ТВ; Ж; Г	ТВ; Ж; Г	ТВ; Г	Ж; Г	Г
Проницаемость при давлении 10^5 Па и температуре 298 К, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$:					
по азоту	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-10}$ $4,0 \cdot 10^{-9} **$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$
по кислороду	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	—	—	—
по водороду	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-7}$	—	—	—
по гелию	—	$5,4 \cdot 10^{-7}$	—	—	—

* После обезгаживания.

** При 373 К.

Уплотнители для вакуумных систем изготавливаются из резин марок 7889, 9024, 51-1578, 51-1433 и др. Одной из важнейших характеристик вакуумных резин является их проницаемость (табл. 17.1).

Наибольшей проницаемостью из газов обладает водород, затем в порядке уменьшения следуют гелий, кислород и азот. Кроме перечисленных выше газов, резины проницаемы для паров многих растворителей (бензол, бензин, этиловый эфир, толуол и др.), а также для сложных газов (аммиак, этан, хлористый водород).

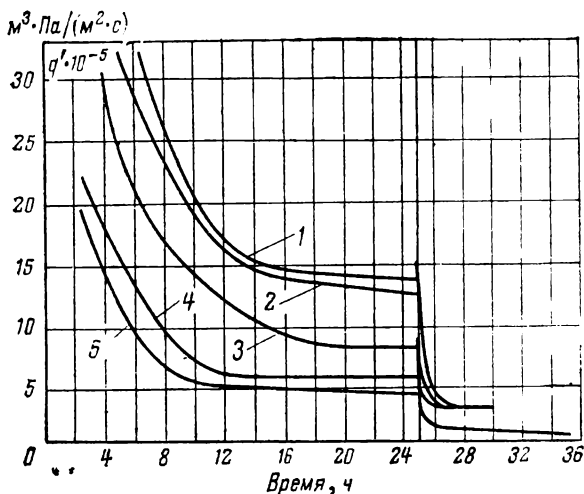


Рис. 17.3. Зависимость скорости удельного газовыделения q' резин различных марок от времени их прогрева.

1 — резина 1015 при 350 К; 2 — резина 9024 при 350 К; 3 — резина 14Р-23 при 473 К; 4 — резина 14Р-2 при 420 К; 5 — резина 7889 при 340 К; вертикальной чертой на кривых отмечено время снижения температуры до 293 К.

При прогреве в вакууме из резины выделяются газообразные, жидкие и твердые продукты, причем скорость выделения этих продуктов увеличивается с возрастанием температуры.

При длительном прогреве резины в вакууме и последующем охлаждении до комнатной температуры скорость газовыделения уменьшается и достигает мало меняющейся величины (рис. 17.3).

Резиновые уплотнители часто вырезаются из пластин (ТУ38-105116-70) или склеиваются из шнура прямоугольного или круглого сечения (ТУ38-105108-70), одна-

Таблица 17.2

Удельные скорости газовыделения $q'_{\text{дес}}$ из некоторых неметаллических материалов

Материал	$q'_{\text{дес}}, \text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Примечание
Пластмассы	$1,2 \cdot 10^{-1} - 4 \cdot 10^{-3}$	После обезгаживания при 520 К в течение 120 ч и охлаждения до 430 К
Компаунды	$3,3 \cdot 10^{-1}$	
Пресс-материалы (например, АГ-4С)	$1,5 \cdot 10^{-1}$	
Клеи на основе формальдегидных смол (например, БФ-4)	$4 \cdot 10^{-4}$	То же
Лаки (например, МЛ-92)	$1,5 \cdot 10^{-4}$	То же
Провода марок ПЭИТ-имидный, ПЭТВ, ПЭФ)	$5 \cdot 10^{-4} *$	То же
Керамика (например, 22ХС)	$4 \cdot 10^{-6}$	После выдержки в вакууме при 670 К в течение 72 ч и охлаждения до 293 К
Стекло известковое натриевое	$1,5 \cdot 10^{-8}$	После выдержки в вакууме при 470 К в течение 2 ч
	$2 \cdot 10^{-2}$	После выдержки в вакууме при 720 К в течение 2 ч
	$1,5 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-5}$	После остывания до 293 К

* Удельная скорость газовыделения отнесена к 1 м длины.

ко наилучшие результаты получаются при непосредственном формовании резиновой смеси и последующей вулканизации в пресс-формах.

Пластмассы. Фторопласт-4 обладает широким рабочим температурным диапазоном (от 180 до 520 К) и малым собственным газовыделением (примерно в 10 раз меньше, чем у лучших сортов вакуумной резины).

Однако фторопласт-4 имеет малую упругость и большую остаточную деформацию и текучесть, которые возрастают с увеличением температуры и давления. Кроме того, при температуре выше 520 К из фторопласта начинает выделяться фтор.

При изготовлении уплотнителей из фторопласта-4 необходимо, чтобы зазоры в стыках разъемного соединения не превышали 0,1 мм, с тем чтобы предотвратить вытекание уплотнителя.

Сжатие фторопластового уплотнителя целесообразно осуществлять с постоянным поджимом, причем усилие сжатия уплотнителя должно быть не более $30 \cdot 10^5$ Па.

Из-за высоких диэлектрических свойств, не зависящих от частоты приложенного напряжения и мало зависящих от температуры, фторопласт часто используют для изготовления вакуумно-плотных электрических вводов.

Удельные скорости газовыделения из некоторых неметаллических материалов приведены в табл. 17.2.

17.4. РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Рабочие жидкости для механических вакуумных насосов. В качестве рабочих жидкостей механических вакуумных насосов, как правило, используют минеральные масла марок ВМ-4 и ВМ-6 (табл. 17.3).

Таблица 17.3

Физико-химические характеристики масел для механических вакуумных насосов с масляным уплотнением

Марка масла	Давление пара при 293 К, Па	Вязкость кинематическая при 323 К, 10^{-6} м ² /с
ВМ-4*	$6,6 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-3}$	47—57
ВМ-6**	$1,3 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-5}$	30—40

* ГОСТ 7903-56.

** МРТУ 33-1-261-68. Дистиллятное с узким фракционным составом: не содержит легколетучих примесей; обладает полой температурной зависимостью вязкости; превосходит масло ВМ-4 в несколько раз по окислительной стабильности.

Рабочие жидкости для пароструйных насосов. К рабочим жидкостям для пароструйных вакуумных насосов предъявляются следующие основные требования:

1. Низкое давление насыщенного пара при комнатной температуре.

2. Высокое давление пара при рабочей температуре в испарителе, что обеспечивает работу насоса при относительно высоких выпускных давлениях.

3. Однородность состава, так как любое изменение состава жидкости из-за улетучивания отдельных компонентов вызовет изменение характеристик насоса.

4. Термическая стабильность при рабочей температуре в испарителе насоса и термоокислительная устойчивость.

5. Малая химическая активность по отношению к конструкционным материалам.

6. Малая удельная теплота парообразования для уменьшения затрат мощности на создание требуемого количества пара в насосе.

7. Малая способность к растворению откачиваемых газов, что обеспечивает получение низких предельных остаточных давлений благодаря малому обратному выделению газов струей пара на впуске насоса.

В настоящее время в пароструйных насосах используют в основном три типа рабочих жидкостей: *минеральные масла, сложные эфиры органических спиртов и кремнийорганические соединения*. Их основные характеристики приведены в табл. 17.4, 17.5.

Таблица 17.4

Физико-химические характеристики масел для бустерных насосов

Марка масла	Молекулярная масса, кг/кмоль	Плотность, кг/м³	Давление пара при 293 К, Па	Вязкость кинематическая при 323 К, $\times 10^6$ м²/с	Теплота парообразования, кДж/кмоль
ВМ-3*	—	850	$1,3 \cdot 10^{-2} - 1,3 \cdot 10^{-3}$	7—10	$1,13 \cdot 10^5$
Г**	350	850	$6,6 \cdot 10^{-3} - 1,3 \cdot 10^{-4}$	12,5—15,3	$1 \cdot 10^5$

* МРТУ 38-1-261-68. Срок службы в высокопроизводительных насосах небольшой из-за быстрого окисления кислородом воздуха.

** ГОСТ 9184-75. Аналогично по эксплуатационным свойствам маслу ВМ-3.

Масла, используемые в качестве рабочих жидкостей для пароструйных насосов, обладают следующими характеристиками: низким давлением насыщенных паров

Физико-химические характеристики масел для паромасляных диффузионных насосов

Марка масла	Молекулярная масса, кг/кмоль	Плотность, кг/м ³	Давление пара при 293 К, Па	Предельное остаточное давление пароструйного насоса, Па	Вязкость кинематическая при 323 К, 10 ⁶ м ² /с	Теплота парообразования, кДж/кмоль	Примечания
<i>Минеральные</i>							
ВМ-1 ГОСТ 5.671-70	450	870	$5,3 \cdot 10^{-6}$ — $2,6 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	65—69	$1,15 \cdot 10^5$	По мере работы предельное остаточное давление насоса уменьшается. При попадании воздуха в горячий насос масло быстро окисляется и ухудшаются характеристики насоса
ВМ-5 МРТУ 38-1-261-68	450	870	$1,3 \cdot 10^{-6}$ — $1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	—	—	Масло узкого фракционного состава
ВМ-7 ВТУМ 3-17-62	—	—	$4 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	80—95	—	По сравнению с маслом ВМ-1 обладает более высокой окислительной стабильностью
<i>Сложные эфиры</i>							
Продукт ОС ТУЛП-172-65	426	910	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	8,5	—	Неустойчив к воздействию паров воды; в металлических насосах быстро выходит из строя

Марка масла	Молекулярная масса, кг/кмоль	Плотность, кг/м ³	Давление пара при 293 К, Па	Предельное остаточное давление пароструйного насоса, Па	Вязкость кинематическая при 323 К, 10 ⁶ м ² /с	Теплота парообразования, кДж/кмоль	Примечания
Продукт ОФ ТУЛП-172-65	390	980	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	—	—	Аналогично эксплуатационным свойствам продукта ОС
5Ф4Э ТУ 609-447-70	446	1200	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$9,3 \cdot 10^{-7}$	130	—	—
<i>Кремнийорганические</i>							
ПЭС-В-1 (ВКЖ-94А) ГОСТ 16480-70	700	970	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	16—33	$1,19 \cdot 10^5$	По сравнению с маслом ВМ-1 обладает более высокой окислительной стабильностью
ПЭС-В-2 (ВКЖ-94Б) ГОСТ 16480-70	700	970	$1,3 \cdot 10^{-6}$ — $1,3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$ — $1,3 \cdot 10^{-3}$	16—33	—	
ПФМС-2/5л РТУ 6-02-717-73	700	1050— 1070	$6,6 \cdot 10^{-7}$ — $9 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	8—13	$1,24 \cdot 10^5$	
ФМ-1 ТУ 11-134-69	546,9	1096	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-6}$	35—37	—	Характеризуется очень высокой воздухостойкостью. При многократном контакте горячего масла с атмосферным воздухом не ухудшает характеристики насоса

при комнатной температуре, что позволяет получать предельное остаточное давление не выше $5 \cdot 10^{-4}$ Па без использования низкотемпературных охлаждаемых ловушек; химической инертностью и, как правило, отсутствием токсичности. Это обусловило широкое применение масла в качестве рабочей жидкости, несмотря на то, что многие масла неоднородны по фракционному составу, чувствительны к перегревам, склонны к образованию летучих фракций и окислению, имеют значительную газопоглотительную способность.

Все масла в той или иной мере разлагаются при рабочей температуре в кипятильнике насоса и поэтому имеют ограниченный срок службы.

Эфиры, используемые в качестве рабочих жидкостей для пароструйных насосов, представляют собой сложные продукты синтеза фталевой и себациновой кислот с высшими спиртами, а также полифениловые соединения. Эти жидкости являются индивидуальными веществами и поэтому однородны по составу, что позволяет получить в насосах весьма низкие предельные остаточные давления около 10^{-5} — 10^{-6} Па и ниже.

Кремнийорганические масла представляют собой соединения, молекулы которых состоят из чередующихся атомов кремния и кислорода с присоединенными углеродными радикалами по свободным связям кремния. Благодаря сильной связи между кремнием и кислородом они обладают высокой термической и термоокислительной устойчивостью, в связи с чем попадание в горячий насос на непродолжительное время атмосферного воздуха не приводит к порче масла.

Используемые в отечественных паромасляных диффузионных насосах масла ПЭС-В-1 и ПЭС-В-2 являются узкими фракциями этилполисилоксановых жидкостей. Масла ПФМС-1 (для бустерных), ФМ-1 и ПФМС-2/5 л (для диффузионных насосов) представляют собой полифенилметилсилоксановые жидкости.

Глава восемнадцатая

ПРОВОДИМОСТИ ВАКУУМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

18.1. ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗА ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ

Турбулентный и вязкостный режимы течения газа

Проводимость отверстия при турбулентном и вязкостном режимах течения газа зависит от отношения давления газа в сосуде p_c к давлению газа p в пространстве, куда он вытекает.

При

$$\frac{p}{p_c} > \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}, \quad (18.1)$$

где κ — показатель адиабаты;

$\kappa = 1,67$ для одноатомных газов;

$\kappa = 1,40$ для двухатомных газов;

$\kappa = 1,30$ для трехатомных газов,

проводимость отверстия определяется по формуле

$$U_v = \frac{A}{1 - p/p_c} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \left(\frac{p}{p_c} \right)^{2/\kappa} \left[1 - \left(\frac{p}{p_c} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}, \quad (18.2)$$

где A — площадь отверстия;

M — молекулярная масса;

R_0 — универсальная газовая постоянная;

T — температура газа.

При

$$\frac{p}{p_c} \leq \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (18.3)$$

проводимость отверстия определяется по формуле

$$U_v = \frac{A}{1 - p/p_c} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}} \quad (18.4)$$

Постоянная в правой части уравнений (18.1) и (18.3)

$$\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \begin{cases} 0,487 & \text{для одноатомных газов;} \\ 0,528 & \text{для двухатомных газов;} \\ 0,546 & \text{для трехатомных газов.} \end{cases} \quad (18.5)$$

Для воздуха при температуре 293 К и $p/p_c > 0,528$ проводимость отверстия будет

$$U_v = \frac{7,66 \cdot 10^2 A}{1 - \frac{p}{p_c}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_c}\right)^{1,43} \left[1 - \left(\frac{p}{p_c}\right)^{0,283}\right]} \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (18.6)$$

и при p/p_c меньше или равна 0,528:

$$U_v \approx \frac{200A}{1 - p/p_c}, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (18.7)$$

где A — площадь отверстия, м².

Если p/p_c меньше 0,1, то вместо (18.4) и (18.7) можно использовать приближенные выражения:

$$\left. \begin{aligned} U_v &\approx A \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \\ U_v &\approx 200A, \quad \text{м}^3/\text{с}. \end{aligned} \right\} \quad (18.8)$$

Молекулярный режим течения газа

Для молекулярного режима течения газа проводимость отверстия равна:

$$U_m = \frac{1}{4} u_a A = A \sqrt{\frac{R_0 T}{2\pi M}} = 36,4A \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (18.9)$$

где u_a — средняя арифметическая скорость молекул газа.

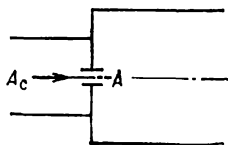


Рис. 18.1. К расчету проводимости отверстия.

A — площадь отверстия; A_c — площадь поперечного сечения трубопровода или сосуда, из которого течет газ.

В случае истечения из сосуда, размеры которого соизмеримы с размерами отверстия (рис. 18.1), следует ввести поправку, с учетом которой *проводимость отвер-*

ствия равна:

$$U_m = \frac{U_{m,отв} K}{1 - \frac{A}{A_c}}, \quad (18.10)$$

где $U_{m,отв}$ — проводимость отверстия, рассчитанная по формуле (18.9);

A — площадь отверстия;

A_c — площадь поперечного сечения сосуда;

K — поправочный коэффициент, являющийся функцией отношения диаметра отверстия d к диаметру трубопровода (сосуда) $d_{тр}$.

Значения коэффициента K приведены в табл. 18.1.

Таблица 18.1

Коэффициент K в формуле (18.10)

$d/d_{тр}$	K	$d/d_{тр}$	K
0,0	1,000	0,6	1,074
0,1	1,002	0,7	1,107
0,2	1,007	0,8	1,152
0,3	1,017	0,9	1,216
0,4	1,030	1,0	1,333
0,5	1,049		

Для воздуха при 293 К *проводимость отверстия равна:*

$$U_m = \frac{116AK}{1 - \frac{A}{A_c}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (18.11)$$

где A — площадь отверстия, м²;

A_c — площадь поперечного сечения сосуда, м².

Молекулярно-вязкостный режим течения газа

Исходя из формулы (18.8), соответствующей вязкостному режиму, и формулы (18.11) для молекулярного режима, можно заключить, что при *молекулярно-вязкостном режиме проводимость отверстия находится между значениями проводимости отверстия, соответствующими вязкостному и молекулярному режимам*, и если мы имеем дело с воздухом при температуре 293 К, то можно считать, что величина проводимости отверстия при мо-

лекулярно-вязкостном режиме находится в пределах между 200 и 116 А.

Проводимость отверстия при молекулярно-вязкостном режиме можно оценить методом линейной интерполяции по формуле

$$U_{м-в} = U_m + \frac{U_v - U_m}{p_v - p_m} (p_i - p_m), \quad (18.12)$$

где U_m — проводимость отверстия при молекулярном режиме течения газа; определяется по формулам (18.9) и (18.11);

U_v — проводимость отверстия при вязкостном режиме течения газа, определяется по формуле (18.8);

p_v — верхняя граница молекулярно-вязкостного режима, см. (2.19);

p_m — нижняя граница молекулярно-вязкостного режима, см. (2.17);

p_i — давление, для которого определяется $U_{м-в}$.

18.2. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ПО ТРУБОПРОВОДАМ

Турбулентный режим течения газа

Для длинного цилиндрического трубопровода при турбулентном режиме течения газа проводимость равна:

$$U_\tau = \frac{1,57}{\lambda_1^{1/7}} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{d^{19/7}}{l^{4/7}} \frac{(p_1 + p_2)^{4/7}}{(p_1 - p_2)^{3/7}}, \quad (18.13)$$

где $\lambda_1 = \lambda p$ — длина свободного пути молекулы при давлении 1 Па, м;

T — температура среды в начальном сечении трубопровода, К;

R_0 — универсальная газовая постоянная;

M — молекулярная масса газа, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$;

d — диаметр трубопровода, м;

l — длина трубопровода, м;

p_1 и p_2 — давления на входе и выходе из трубопровода соответственно, Па.

Условия применимости формулы (18.13), выраженные через давления на входе p_1 и выходе p_2 из трубопровода, будут следующими:

$$p_2 \sqrt{1 + \frac{0,169 a^{7/4} p_1^{3/4} \eta^{1/4} l}{d^{5/4} p_2^{1/4}}} \geq p_1 \geq$$

$$\geq \sqrt{p_2^2 + \frac{2,24 \cdot 10^5 \eta^2 l}{\rho_1 d^5}}, \quad (18.14)$$

где ρ_1 — плотность газа при давлении 1 Па, кг/м³;
 η — коэффициент вязкости газа, Па·с;
 l — длина трубопровода, м;
 d — диаметр трубопровода, м;

$$a = \sqrt{\frac{\kappa R_0 T}{M}} — \text{скорость звука, м/с.} \quad (18.15)$$

Для воздуха при 293 К получим:

$$U_T = \frac{940 d^{19/7}}{l^{4/7}} \frac{(p_1 + p_2)^{4/7}}{(p_1 - p_2)^{3/7}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (18.16)$$

а условие применимости формулы (18.16) имеет при этом вид:

$$\sqrt{p_2^2 + \frac{0,06 p_2^{7/4} l}{d^{5/4}}} \geq p_1 \geq \sqrt{p_2^2 + \frac{6,16 l}{d^3}}. \quad (18.17)$$

Проводимость или сопротивление *коротких* трубопроводов, т. е. трубопроводов, у которых l/d меньше 50, может быть рассчитана следующим образом:

$$W_\Sigma = W_{\text{тр}} + W_{\text{отв}}, \quad (18.18)$$

где $W_\Sigma = \frac{1}{U_T}$ — сопротивление короткого трубопровода,
а U_T — его проводимость;

$W_{\text{тр}} = \frac{1}{U_{\text{тр}}}$ — сопротивление длинного трубопровода,
а $U_{\text{тр}}$ — его проводимость, рассчитанная по формулам (18.13) или (18.16);

$W_{\text{отв}} = \frac{1}{U_{\text{отв}}}$ — сопротивление входного отверстия,
а $U_{\text{отв}}$ — его проводимость, рассчитываемая по формулам (18.2), (18.4), (18.6), (18.7) или (18.8).

Вязкостный режим течения газа

Значение проводимости длинного *трубопровода* при *вязкостном* режиме течения газа можно получить на основании уравнения Пуазейля:

$$Q' = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} (p_1 - p_2) \frac{p_1 + p_2}{2}, \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}}, \quad (18.19)$$

где Q' — поток газа через трубопровод;

d — диаметр трубопровода, м;
 η — коэффициент вязкости газа, Па·с;
 l — длина трубопровода, м;
 p_1 и p_2 — давления газа на входе и выходе трубопровода соответственно, Па.

В соответствии с формулой (2.5) получим следующее выражение проводимости *трубопровода при вязкостном режиме* течения газа:

$$U_b = \frac{Q'}{p_1 - p_2} = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (18.20)$$

Для воздуха при 293 К получим:

$$U_b = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (18.21)$$

Проводимость $U_{\text{в.кор}}$ *короткого* трубопровода, у которого длина

$$l \leq 0,029 d Re, \quad (18.22)$$

где d — диаметр трубопровода;

Re — число Рейнольдса [см. (2.13)], может быть найдена по формуле

$$U_{\text{в.кор}} = \frac{U_b}{K_1}, \quad (18.23)$$

где U_b — проводимость *длинного* трубопровода, определяемая по формулам (18.20), (18.21);

K_1 — коэффициент, определяемый по графику на рис. 18.2.

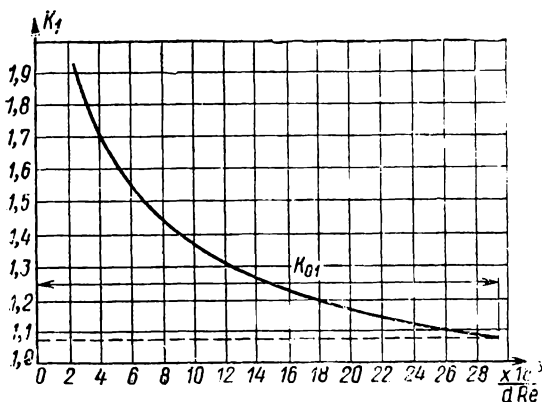


Рис. 18.2. График для определения коэффициента K_1 .

Проводимость трубопроводов с длиной

$$0,029d\text{Re} < l < 100d$$

определяется по формуле

$$U_{\text{в}} = \frac{\pi d^4}{256 \eta l} \frac{(p_1 + p_2)}{\left[1 + 0,0104 \frac{m}{\pi \eta k T} \frac{Q'}{l} \right]}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (18.24)$$

где d — диаметр трубопровода, м;

l — длина трубопровода, м;

η — коэффициент динамической вязкости, Па·с;

p_1 и p_2 — давления на концах трубопровода, Па;

m — масса молекулы газа, кг;

k — постоянная Больцмана;

T — температура газа, К;

Q' — поток газа по трубопроводу, м³·Па/с.

Для воздуха при 293 К проводимость такого трубопровода

$$U_{\text{в}} = \frac{0,68 \cdot 10^{-4} d^4 (p_1 + p_2)}{l \left(1 + 2,15 \cdot 10^{-3} \frac{Q'}{l} \right)}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (18.25)$$

При неизвестном потоке газа Q' расчет по формулам (18.24) и (18.25) ведется методом последовательных приближений до тех пор, пока разница между Q' , принятым при расчете $U_{\text{в}}$, и $Q' = U_{\text{в}}(p_1 - p_2)$ не будет меньше 10%.

Молекулярный режим течения газа

Проводимость цилиндрического трубопровода круглого сечения:

$$U_{\text{м}} = 38,1 \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (18.26)$$

где d — диаметр трубопровода, м;

l — длина трубопровода, м;

T — температура, К;

M — молекулярная масса, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$.

Для воздуха при 293 К

$$U_{\text{м}} = 1,21 \cdot 10^{-3} \frac{d^3}{l}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (18.27)$$

Проводимость коротких трубопроводов ($l < 20d$) может быть рассчитана по формуле Клаузинга:

$$U_m = 36,4 K_2 A \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (18.28)$$

где K_2 — поправочный множитель, значения которого берутся по табл. 18.2;

A — площадь поперечного сечения трубопровода, м^2 .

Таблица 18.2

Поправочный коэффициент K_2 в уравнениях (18.28) и (18.29)

l/d	K_2	l/d	K_2	l/d	K_2	l/d	K_2
0	1	0,65	0,6139	1,6	0,4062	8,0	0,1367
0,05	0,9524	0,70	0,5970	1,7	0,3931	9,0	0,1240
0,10	0,9092	0,75	0,5810	1,8	0,3809	10	0,1135
0,15	0,8699	0,80	0,5659	1,9	0,3695	15	0,0797
0,20	0,8341	0,85	0,5518	2,0	0,3589	20	0,0613
0,25	0,8013	0,90	0,5384	2,5	0,3146	25	0,0499
0,30	0,7711	0,95	0,5256	3,0	0,2807	30	0,0420
0,35	0,7434	1,0	0,5136	3,5	0,2537	35	0,0363
0,40	0,7177	1,1	0,4914	4,0	0,2316	40	0,0319
0,45	0,6940	1,2	0,4711	4,5	0,2131	45	0,0285
0,50	0,6720	1,3	0,4527	5,0	0,1973	50	0,0258
0,55	0,6514	1,4	0,4359	6,0	0,1719	500	0,002658
0,60	0,6320	1,5	0,4205	7,0	0,1523	>500	$4d/3l$

Для воздуха при 293 К проводимость цилиндрического трубопровода любой длины с круглым поперечным сечением равна:

$$U_m = 1,16 \cdot 10^2 K_2 \frac{\pi d^2}{4}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (18.29)$$

Молекулярно-вязкостный режим течения газа

Полный переход от вязкостного режима течения газа к молекулярному занимает интервал давлений примерно в два порядка, причем в этой области приведенные выше соотношения как для вязкостного, так и для молекулярного режимов неприменимы.

Наилучшим образом отвечает экспериментальным данным уравнение Кнудсена, который представил значение проводимости цилиндрического трубопровода как

сумму значений проводимости этого трубопровода при заданном давлении, полученном по уравнению (18.20), и проводимости этого же трубопровода при молекулярном режиме течения, полученном по уравнению (18.26), умноженной на поправочный множитель K_3 . Таким образом, уравнение Кнудсена записывается следующим образом:

$$U_{м-в} = U_в + K_3 U_м, \quad (18.30)$$

где K_3 — коэффициент, учитывающий среднее давление в трубопроводе и равный:

$$K_3 = \frac{1 + \frac{d}{\eta} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 1,24 \frac{d}{\eta} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \frac{p_1 + p_2}{2}}. \quad (18.31)$$

Проводимость длинного цилиндрического трубопровода круглого сечения равна таким образом:

$$U_{м-в} = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} \frac{p_1 + p_2}{2} + \left(\frac{1 + \frac{d}{\eta} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 1,24 \frac{d}{\eta} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \frac{p_1 + p_2}{2}} \right) \times \\ \times 38,1 \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (18.32)$$

Для воздуха при 293 К получим:

$$U_{м-в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \frac{p_1 + p_2}{2} + \left(\frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 d \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 2,35 \cdot 10^4 d \frac{p_1 + p_2}{2}} \right) \times \\ \times 1,21 \cdot 10^2 \frac{d^3}{l}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (18.33)$$

Проводимости коротких трубопроводов при молекулярно-вязкостном режиме течения следует также рассчитывать по формуле (18.30), подставляя в нее значения проводимости рассматриваемого короткого трубопровода, рассчитанные для вязкостного и молекулярного режимов течения газа.

18.3. МЕСТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Турбулентный режим течения газа

При турбулентном режиме течения газа потери давления в местном сопротивлении

$$\Delta p_{\text{местн}} = \xi \frac{\rho u_{\text{ср}}^2}{2}, \quad (18.34)$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления, равный отношению потерянному напору к скоростному напору, равному $\frac{\rho u_{\text{ср}}^2}{2}$;

ρ — плотность среды;

$u_{\text{ср}}$ — средняя по сечению скорость потока газа.

Значения коэффициентов местных сопротивлений можно принимать такими же, как и для несжимаемых жидкостей.

Для колена с углом 90° можно принимать $\xi=1$, для крана коэффициент местного сопротивления равен $\xi=3\div 5,5$.

Вязкостный режим течения газа

Обычно при вязкостном режиме течения газа для учета потери давления в местных сопротивлениях условно увеличивают длину трубопроводов против фактической, полагая, что

$$l_{\text{расч}} = l_{\text{факт}} + l_{\text{экв}}, \quad (18.35)$$

где $l_{\text{факт}}$ — фактическая длина трубопровода;

$l_{\text{экв}}$ — дополнительная длина трубопровода, потери давления на которой равны потерям давления в местных сопротивлениях.

Так, принимают, что влияние изгиба трубопровода под углом 90° учитывается удлинением трубопровода на 1,33 диаметра:

$$l_{\text{расч}} = l_{\text{факт}} + 1,33di, \quad (18.36)$$

где d — диаметр трубопровода;

i — число изгибов трубопровода под углом 90° .

Проводимость крана можно считать равной 50—70% проводимости отверстия с диаметром, равным диаметру условного прохода крана.

При этом проводимость отверстия рассчитывается по (18.8).

Молекулярный режим течения газа

Влияние местных сопротивлений при молекулярном режиме течения газа, так же как и при вязкостном, обычно учитывают путем некоторого увеличения расчетной длины трубопровода против фактической, т. е. используют при расчетах зависимости (18.35) и (18.36).

Проводимость крана принимается равной 6—15% проводимости диафрагмы с диаметром, равным диаметру условного прохода крана. При этом проводимость отверстия рассчитывается по формуле (18.9).

Молекулярно-вязкостный режим течения газа

Проводимость местного сопротивления, в частности крана, при молекулярно-вязкостном режиме может быть рассчитана методом линейной интерполяции по формуле (18.12), в которую вместо значений проводимости отверстия следует подставить значения проводимости местного сопротивления при соответствующих режимах течения газа.

Несколько более точные результаты можно получить при использовании формулы (18.31).

Пример 18.1. Рассчитать проводимость по воздуху электромагнитного клапана с размером проходного сечения ДУ-32 и длиной 120 мм при среднем давлении 7,04 Па (рис. 18.3).

1. Определяем режим течения газа при заданном значении давления $p = 7,04$ Па.

Граница между вязкостным и молекулярно-вязкостным режимами определяется из (2.19):

$$p = \frac{1,33}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 41,6 \text{ Па.}$$

Граница между молекулярно-вязкостным и молекулярным режимами определяется из (2.17):

$$p = \frac{0,02}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 0,624 \text{ Па.}$$

Таким образом, при заданном давлении будет иметь место молекулярно-вязкостный режим течения газа, при котором проводимость клапана определяется по формуле (18.12).

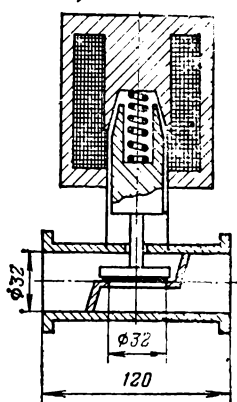


Рис. 18.3. Схема электромагнитного клапана.

2. Проводимость клапана при молекулярном режиме рассчитывается по формуле (18.9) с учетом рекомендаций § 18.3:

$$U_{\text{м.кл}} = 0,1116 \frac{\pi (3,2 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 9,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Проводимость клапана при вязкостном режиме рассчитывается по формуле (18.8) с учетом рекомендаций § 18.3:

$$U_{\text{в.кл}} = 0,6 \cdot 200 \frac{\pi (3,2 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 9,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

4. Определяем по формуле (18.12) проводимость клапана при давлении $p=7,04$ Па:

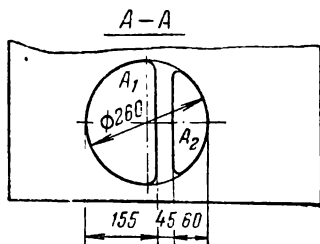
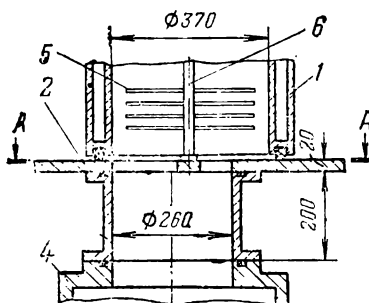
$$U_{\text{м-в.кл}} = 9,2 \cdot 10^{-3} + \frac{9,7 \cdot 10^{-2} - 9,2 \cdot 10^{-3}}{41,6 - 0,624} (7,04 - 0,624) = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Пример 18.2. Определить при молекулярном режиме течения газа проводимость магистрали, соединяющей сосуд с высоковакуумным насосом. Средняя молекулярная масса откачиваемого газа

$$M = 20 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

Проводимость затвора, установленного на вход-

ном отверстия высоковакуумного насоса, равна $3,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Необходимые геометрические размеры и распределение температур приведены на рис. 18.4. Как видно из рисунка, магистраль состоит из диафрагмы на выходе из сосуда (отверстие в плите рабочего сосуда) в



форме двух сегментов разных размеров, патрубка 3 с внутренним диаметром 260 мм и длиной 200 мм и затвора. Форма отверстия в плите рабочего сосуда обычно связана с необходимостью крепления стойки 6 с подставками для размещения продукции.

Расчет проводимости магистрали ведем, разбивая ее на отдельные участки и определяя порознь проводимости каждого.

Рис. 18.4. К примеру расчета проводимости магистрали при молекулярном режиме течения газа.

1 — сосуд (температура стенки 293 К); 2 — плита (температура 293 К); 3 — патрубок (температура 293 К); 4 — присоединительный фланец высоковакуумного агрегата; 5 — тепловые экраны (температура лижнего экрана 653 К); 6 — стойка.

Магистраль состоит из двух параллельно соединенных отверстий A_1 и A_2 (сегментов) в плите 2 и последовательно соединенного с ними соединительного патрубка 3.

1. Определяем проводимость отверстия A_1 ввиду относительно малой толщины плиты 2 по формулам (18.9) и (18.10), коэффициент K принимаем равным 1. Температуру газа на входе в отверстия плиты будем считать равной среднеарифметическому из значений температур нижнего теплового экрана 5 и плиты 2:

$$T = \frac{653 + 293}{2} = 473 \text{ К.}$$

Площадь большего отверстия в плите

$$A_1 = 330 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Площадь входного сечения сосуда

$$A_e = 1070 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Отсюда следует

$$U_1 = \frac{36,4 \cdot 330 \cdot 10^{-4} \sqrt{473/20}}{1 - 330 \cdot 10^{-4} / 1070 \cdot 10^{-4}} = 8,44 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Аналогичным образом определяем проводимость отверстия A_2 . Площадь меньшего отверстия $A_2 = 61 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Отсюда следует:

$$U_2 = \frac{36,4 \cdot 61 \cdot 10^{-4} \sqrt{473/20}}{1 - 61 \cdot 10^{-4} / 1070 \cdot 10^{-4}} = 1,145 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Проводимость соединительного патрубка рассчитываем по формуле (18.28) с поправочным коэффициентом K_2 для коротких трубопроводов. Учитывая теплообмен с холодными стенками патрубка, принимаем температуру газа в нем равной среднеарифметическому значению температур газа на входе в патрубок и его стенок:

$$T = \frac{473 + 293}{2} = 383 \text{ К,}$$

откуда

$$U_{\text{патр}} = 36,4 \cdot 0,575 \frac{\pi (26 \cdot 10^{-2})^2}{4} \sqrt{\frac{383}{20}} = 4,85 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $K_2 = 0,575$ для $\frac{l}{d} = \frac{200}{260} = 0,77$ (см. табл. 18.2).

4. Проводимость всей магистрали рассчитываем, учтя (2.6) и (2.7):

$$W_{\Sigma} = \frac{1}{8,44 + 1,145} + \frac{1}{4,85} + \frac{1}{3,5} = \frac{1}{1,677} \text{ с/м}^3;$$

$$U_{\Sigma} = 1,677 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Пример 18.3. Определить проводимость трубопровода по воздуху при 293 К диаметром $d = 40 \text{ мм} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и длиной 1 м при давлениях на концах трубопровода

$$p_1 = 2003 \text{ Па и } p_2 = 2000 \text{ Па.}$$

1. Для определения режима течения газа подсчитываем произведение среднего давления на диаметр трубопровода:

$$\overline{p}d = \frac{p_1 + p_2}{2} d = \frac{2003 + 2000}{2} \cdot 4 \cdot 10^{-2} = 80,12 \text{ Па}.$$

Согласно формуле (2.19) принимаем, что режим течения *вязкостный*.

2. По формуле (18.21) рассчитываем проводимость трубопровода:

$$U_v = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{(4 \cdot 10^{-2})^4}{1} \cdot \frac{2003 + 2000}{2} = 6,97 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. По формуле (18.20) определяем поток воздуха в трубопроводе:

$$Q' = U_v(p_1 - p_2) = 6,97(2003 - 2000) = 20,91 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}.$$

4. По формуле (2.14) определяем число Рейнольдса.

Взяв из приложения 1 для воздуха

$$m = 4,811 \cdot 10^{-26} \text{ кг}; \quad \eta = 1,808 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с},$$

получим:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot 4,811 \cdot 10^{-26}}{\pi \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 1,808 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{20,91}{4 \cdot 10^{-2}} = 604,5.$$

Так как Re меньше 2200, режим течения *вязкостный* [см. (2.15)].

5. Находим значение произведения

$$0,029d \text{ Re} = 0,029 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 604,5 = 0,7 \text{ м}.$$

Таким образом для расчета проводимости в соответствии с рекомендациями § 18.2 для вязкостного режима течения используем формулу (18.25):

$$U_v = \frac{0,68 \cdot 10^3 (4 \cdot 10^{-2})^4 (2003 + 2000)}{1 (1 + 2,15 \cdot 10^{-3} \cdot 20,91/1)} = 6,66 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Так как разница между рассчитанными в пп. 2 и 5 значениями U_v меньше 10%, то принимаем $U_v = 6,66 \text{ м}^3/\text{с}$.

Глава девятнадцатая

ВЫБОР СРЕДСТВ ОТКАЧКИ

19.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ БЫСТРОТЫ ДЕЙСТВИЯ ВАКУУМНОГО НАСОСА

Быстрота действия S_n вакуумного насоса при проектном расчете выбирается из условия обеспечения рабочего давления в установившемся режиме работы вакуумной системы.

Для этого, используя формулу (2.26), подсчитывают суммарный поток газов Q'_Σ , поступающих в вакуумную систему, по уравнению (2.4) определяют эффективную быстроту откачки S_0 и затем находят S_H , полагая, что

$$S_H = \nu S_0, \quad (19.1)$$

где ν — коэффициент использования насоса.

Обычно $\nu=2$ для молекулярных и криогенных насосов, $\nu=4$ для сорбционных насосов и $\nu=1,1 \rightarrow 1,25$ для механических насосов объемного действия (см. табл. 6.1).

19.2. СОГЛАСОВАНИЕ НАСОСОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО

Большинство насосов, таких как пароструйные, турбомолекулярные и двухроторные вакуумные насосы, для запуска и работы требуют создания и поддержания определенного разрежения во всей вакуумной системе, включая насос.

Выбор параметров вспомогательного насоса для создания предварительного разрежения основан на том, что поток откачиваемых газов должен быть одинаковым в любом сечении вакуумной системы. Иными словами, поток газов Q' одинаков в данный момент времени для основного и вспомогательного насосов, соединенных последовательно (рис. 19.1):

$$Q' = S_{H.осн} p_1 = S_{H.всп} p_2, \quad (19.2)$$

где $S_{H.осн}$ — быстрота действия основного высоковакуумного насоса 6 при давлении p_1 на входе в основной насос;

$S_{H.всп}$ — быстрота действия вспомогательного механического вакуумного насоса 4 при давлении p_2 на входе во вспомогательный насос в тот же момент времени.

Так как давление p_1 на входе в основной насос и давление p_2 на входе во вспомогательный насос различны, то и быстрота действия $S_{H.осн}$ будет отличаться от $S_{H.всп}$. Давление p_2 на входе во вспомогательный насос должно быть меньше давления $p_{наиб}$ (обычно приводится в паспорте высоковакуумного насоса) на выходе из высоковакуумного насоса, так как $p_{наиб}$ является наибольшим давлением на выходе, при котором еще работает высоковакуумный насос.

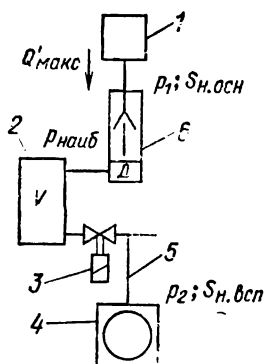


Рис. 19.1. К выбору насосов, работающих последовательно.

1 — откачиваемый сосуд; 2 — форвакуумный баллон; 3 — электромагнитный клапан (ДУ-32; $l=120$ мм); 4 — вспомогательный механический вакуумный насос; 5 — трубопровод ($d_{вн}=32$ мм; $l_{общ}=80$ см); 6 — основной высоковакуумный насос.

Таким образом, вспомогательный насос должен быть способен не только удалять в единицу времени определенное количество газов, поступающих из основного насоса, но и поддерживать определенное выпускное давление (равное или меньше $p_{наиб}$) на выходе основного насоса.

После того как выбран тип насоса предварительного разрежения; необходимая быстрота действия его $S_{н.всп}$ определяется исходя из максимального количества газов $Q'_{\max}$, которое предполагается удалять высоковакуумным насосом:

$$S_{н.всп} = Q'_{\max} / p_2, \quad (19.3)$$

где $Q'_{\max}$ — наибольший поток газов, который может быть удален основным насосом (определяется по характеристике насоса);

p_2 — наибольшее допустимое давление на входе во вспомогательный насос; обычно $p_2 = (0,7 \div 0,75) p_{наиб}$ ($p_{наиб}$ — давление на выпускной стороне основного насоса, выше которого насос прекращает свою работу).

Диаметр трубопровода, соединяющего насосы, обычно выбирают равным или несколько большим диаметра выпускного патрубка основного насоса. Затем определяют режим течения газа в соединительном трубопроводе при давлении p_2 и подсчитывают его проводимость.

После этого необходимо произвести поверочный расчет, целью которого является определение давления, которое обеспечит выбранный вспомогательный насос в сечении выпускного патрубка основного насоса с учетом сопротивления соединительного трубопровода:

$$p_{вып} = \frac{Q'_{\max}}{S_0} = \frac{Q'_{\max} (U + S_{н.всп})}{U S_{н.всп}} \leq p_{наиб}. \quad (19.4)$$

Если неравенство (19.4) не выполняется, то надо взять вспомогательный насос с большей быстротой дей-

ствия или увеличить проводимость трубопровода U , соединяющего основной и вспомогательный насосы, и заново осуществить поверочный расчет.

Довольно часто требуется исключить влияние вспомогательного насоса на работу основного насоса, сказывающегося, например, в проникновении паров рабочей жидкости из механического насоса в кипятильник паромасляного диффузионного высоковакуумного насоса. В этом случае между основным и вспомогательным насосами может быть установлена ловушка, но гораздо лучшие результаты обеспечивает применение бустерного насоса, в качестве которого часто используется также диффузионный насос. При этом проводится согласование основного и вспомогательного насосов, бустерный же насос обычно выбирается со значительным запасом по производительности, часто на порядок и более.

19.3. СОГЛАСОВАНИЕ НАСОСОВ, РАБОТАЮЩИХ ПАРАЛЛЕЛЬНО

Параллельно обычно включаются насосы, имеющие избирательные характеристики по откачке различных газов. К таким насосам относятся адсорбционные, ионно-геттерные, магниторазрядные и другие электрофизические средства откачки. Укажем, что при этом совершенно не обязательно соединять насосы параллельно трубопроводам. Насосы могут быть конструктивно соединены и последовательно, но работать они при этом будут параллельно. Характерным примером такого включения насосов является совместная работа на один откачиваемый сосуд конденсационного водородного и пароструйного насосов. В этом случае пароструйный насос предназначен для откачки не конденсирующихся при температуре жидкого водорода газов (водород, неон, гелий) и создания предварительного разрежения в конденсационном насосе.

Совершенно так же параллельно ионно-геттерным насосам могут подключаться пароструйные или турбомолекулярные насосы, которые обеспечивают откачку инертных газов и метана.

Расчет вспомогательного насоса при этом сводится к определению потока не откачиваемых основным насосом газов и подбору вспомогательного насоса по принципу и скорости действия.

При согласовании вспомогательного насоса с электрофизическим насосом, например магнитным электро-разрядным, следует учитывать собственную быстроту действия основного насоса по рассматриваемому газу. Вспомогательный насос должен в сумме с основным насосом обеспечить удаление всего потока газа.

Довольно часто при конструировании вакуумных систем предусматривается установка нескольких однотипных насосов, работающих параллельно на один вакуумный сосуд с целью получения необходимой эффективной скорости откачки. Такой прием дает удовлетворительные результаты, если все насосы обеспечивают получение близких значений предельного остаточного давления. В противном случае возможно перетекание газов и существенное снижение суммарной эффективной скорости откачки сосуда.

В подобных вакуумных системах целесообразно предусматривать возможность отключения насосов порознь с целью определения их характеристик и, в частности, предельного остаточного давления.

19.4. РАСЧЕТ ФОРВАКУУМНОГО БАЛЛОНА

В некоторых случаях с целью уменьшения количества вакуумных насосов, сокращения габаритов вакуумной системы, исключения вибраций от механического вакуумного насоса и увеличения коэффициента загрузки насосов между основным насосом и насосом предварительного разрежения устанавливают форвакуумный баллон, что позволяет отключать на длительное время насос предварительного разрежения или использовать его для откачки других частей вакуумной системы (рис. 19.1).

Поток газа из сосуда 1, откачиваемый основным насосом 6, попадает в форвакуумный баллон 2 и увеличивает давление в нем от минимального $p_{\text{мин}}$, которое достигается при откачке форвакуумного баллона насосом предварительного разрежения 4, до максимального $p_{\text{макс}}$, близкого к давлению, выше которого основной насос 6 прекращает работу.

Когда давление в форвакуумном баллоне достигает $p_{\text{макс}}$, включается насос предварительного разрежения и баллон откачивается до давления $p_{\text{мин}}$.

Промежуток времени $t_{\text{ф.б.}}$, в течение которого форвакуумный баллон изолирован от насоса предварительно-

го разрежения, называется временем работы форвакуумного баллона.

Так как весь поток газа, проходящий через основной насос, идет на повышение давления в форвакуумном баллоне, то можно записать:

$$Q'_{\Sigma} t_{ф.б} = V (p_{\max} - p_{\min}), \quad (19.5)$$

где Q_{Σ} — суммарный поток газов, обусловленный потоком газов в выпускном патрубке основного насоса в данный момент времени и потоком газов, выделяющихся со стенок форвакуумного баллона и вакуумной системы, соединяющей его с основным насосом;

$t_{ф.б}$ — время работы форвакуумного баллона;

V — объем форвакуумного баллона.

Из уравнения (19.5) определяют объем форвакуумного баллона, исходя обычно из следующих условий:

$$p_{\max} = (0,3 + 0,8) p_{\text{наиб}}, \quad (19.6)$$

где $p_{\text{наиб}}$ — давление на выпускной стороне основного насоса (см. § 6.2);

$p_{\min}$ — минимальное значение давления в форвакуумном баллоне, равное:

$$p_{\min} = \frac{Q'_{\Sigma} (S_{н.всп} + U_{тр})}{S_{н.всп} U_{тр}}, \quad (19.7)$$

где $S_{н.всп}$ — быстрота действия насоса предварительного разрежения;

$U_{тр}$ — проводимость трубопровода между основным насосом и насосом предварительного разрежения.

Пример 19.1. Проверить согласование высоковакуумного насоса Н-250/2500 ($p_{\text{наиб}} = 13,3$ Па) и механического вакуумного насоса 2НВР-5Д, соединенных последовательно при наибольшем потоке поступающих в высоковакуумный насос газов, равном $2,82 \times 10^{-2}$ м³·Па/с.

Размеры вакуумной магистрали, соединяющей насосы, даны в тексте к рис. 19.1.

1. С помощью графика $S_n = f(p)$ для механического вакуумного насоса (рис. 19.2) находим давление на входе в насос, при котором его производительность равна $Q'_n = 2,82 \cdot 10^{-2}$ м³·Па/с.

Учтя зависимость (19.3), получим:

$$p_{2\max} \approx 7,04 \text{ Па},$$

поскольку при $S_n = 4 \cdot 10^{-3}$ м³/с

$$Q'_n = 7,04 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 2,82 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}}.$$

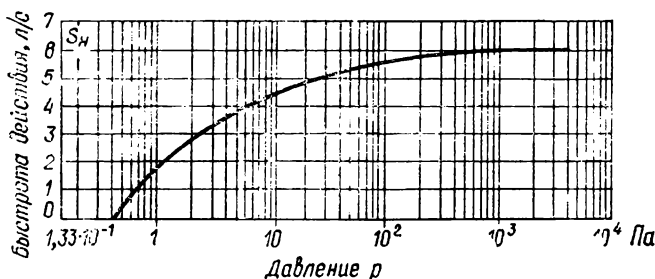


Рис. 19.2. Зависимость быстроты действия S_n от впускного давления p для механического вакуумного насоса.

Таким образом, $p_{2\text{макс}}$ меньше $(0,7—0,75)p_{\text{наиб}}$, где $p_{\text{наиб}}$ — давление на выпускном патрубке основного высоковакуумного насоса, при котором насос прекращает работу.

2. Определяем режим течения газа в соединительном трубопроводе 5.

а) Граница между вязкостным и молекулярно-вязкостным режимами течения газа будет (см. § 2.5):

$$p_{\text{в-м-в}} = \frac{1,33}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 41,6 \text{ Па.}$$

б) Граница между молекулярно-вязкостным и молекулярным режимами течения газа будет:

$$p_{\text{м-в-м}} = \frac{0,02}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 0,625 \text{ Па.}$$

Таким образом, в соединительном трубопроводе 5 при $p_{2\text{макс}} = 7,04$ Па имеет место молекулярно-вязкостный режим течения газа.

3. Определяем по формулам (18.33) и (18.36) проводимость трубопровода 5, учтя два колена под углом 90° :

$$\begin{aligned} l_{\text{расч}} &= 0,8 + 1,33 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 2 = 8,85 \cdot 10^{-1} \text{ м;} \\ U_{\text{тр}} &= 1,36 \cdot 10^8 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^4}{8,85 \cdot 10^{-1}} 7,04 + \\ &+ \left(\frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 7,04}{1 + 2,35 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 7,04} \right) 1,21 \cdot 10^2 \times \\ &\times \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^3}{8,85 \cdot 10^{-1}} = 1,486 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с.} \end{aligned}$$

4. Проводимость электромагнитного клапана 3 рассчитана в примере 18.1 и равна $U_{\text{кл}} = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$.

5. Определяем по формуле (2.6) суммарную проводимость соединительного трубопровода 5 без учета проводимости форвакуумного баллона ввиду весьма малого сопротивления последнего потоку откачиваемых газов:

$$\begin{aligned} 1/U &= 1/U_{\text{тр}} + 1/U_{\text{кл}} = 1/1,486 \cdot 10^{-2} + 1/2,3 \cdot 10^{-2} = \\ &= 1/9,03 \cdot 10^{-3} \text{ с/м}^3; \end{aligned}$$

$$U=9,03 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

6. Определяем по формуле (19.4) давление в сечении выпускного патрубка основного высоковакуумного насоса с учетом сопротивления соединительного трубопровода 5:

$$p_{\text{вып}} = \frac{2,82 \cdot 10^{-2} (9,03 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-3})}{9,03 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 10,14 \text{ Па} < 13,3 \text{ Па} = p_{\text{наиб.}}$$

Так как неравенство (19.4) выполняется, то расчет согласования насосов считаем оконченным.

Пример 19.2. Определить объем V форвакуумного баллона, предназначенного для создания необходимого разрежения при работе основного высоковакуумного насоса ($p_{\text{наиб}} = 13,3 \text{ Па}$), в то время когда вспомогательный вакуумный насос используется для предварительной откачки рабочего сосуда технологической установки.

Расчетное время предварительной откачки рабочего сосуда составляет 240 с. Следует отметить, что в реальных условиях, назначая время отключения вспомогательного насоса (т. е. время работы форвакуумного баллона), необходимо учитывать возможное удлинение времени предварительной откачки, которое может быть вызвано ухудшением работы насоса, большей, чем принято при расчете величины газовыделения и натекания и т. п. Обычно рекомендуется принимать двух-трехкратный запас.

Таким образом, время работы форвакуумного баллона будет равно:

$$t_{\text{ф.б}} = 240 \cdot 3 = 720 \text{ с}.$$

1. Рассчитаем поток газов, проходящий через основной высоковакуумный насос. Этот поток будет обусловлен собственным газовыделением вакуумной системы и натеканием в нее.

Площадь поверхностей, ограничивающих вакуумную систему, складывается из части поверхности высоковакуумного затвора, поверхностей высоковакуумного насоса и форвакуумного баллона и внутренней поверхности соединительных трубопроводов.

Принимаем площадь всех поверхностей трубопроводов вакуумной системы равной $A = 2 \text{ м}^2$, полагая при этом, что площадь внутренней поверхности форвакуумного баллона равна $A_{\text{ф.б}} = 0,5 \text{ м}^2$. Скорость удельного газовыделения поверхности вакуумной системы считаем постоянной и равной

$$q'_{\text{газ}} = 4,12 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}},$$

что соответствует удельной скорости газовыделения нержавеющей стали после 6 ч откачки (см. приложение 7).

Натекания ввиду их относительно небольшой величины учитывать не будем.

Таким образом, поток газов в вакуумной системе при закрытом затворе будет равен:

$$Q'_{\text{газ}} = 8,24 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}.$$

2. Определяем по формуле (19.7) минимальное давление в форвакуумном баллоне. В эту формулу входит проводимость соедини-

тального трубопровода, которая была рассчитана в примере 19.1:

$$U_{\text{тр}} = 1,486 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Так как в диапазоне давлений, близких к $p_{\text{мин}}$, быстрота действия насоса $S_{\text{н.всп}}$ непостоянна, расчет выполняется методом последовательных приближений. Подсчеты, которые здесь не приведены, показывают, что вследствие относительно малой величины газовой выделения и значительной проводимости трубопровода, соединяющего форвакуумный баллон с насосом предварительного разрежения, давление $p_{\text{мин}}$ в форвакуумном баллоне будет весьма близким к предельному давлению вспомогательного насоса ($p_{\text{пред}} = 3,06 \text{ Па}$). Взяв двухкратный запас по минимальному давлению по отношению к предельному давлению вспомогательного насоса, получим:

$$p_{\text{мин}} = 3,06 \cdot 2 = 6,12 \text{ Па}.$$

3. Наибольшее давление в форвакуумном баллоне примем в соответствии с рекомендацией (19.6) равным:

$$p_{\text{макс}} = 0,8 p_{\text{наиб}} = 0,8 \cdot 13,3 \approx 10,5 \text{ Па}.$$

4. Рассчитаем по формуле (19.5) объем форвакуумного баллона:

$$V = \frac{8,24 \cdot 10^{-5} \cdot 720}{10,5 - 6,12} = 13,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

5. Определим геометрические размеры форвакуумного баллона, обеспечивающие необходимый объем.

Обычно берут высоту баллона несколько меньшей высоты высковакуумного насоса. В нашем случае удовлетворительными будут следующие размеры: диаметр — 210 мм = 0,21 м; высота — 420 мм = 0,42 м.

6. Площадь внутренней поверхности форвакуумного баллона равна:

$$A_{\text{ф.б}} = \frac{\pi \cdot 0,24^2}{4} \cdot 2 + \pi \cdot 0,21 \cdot 0,42 \approx 0,35 \text{ м}^2,$$

т. е. несколько меньше принятой при расчете потока газов, что позволяет считать найденные размеры форвакуумного баллона окончательными.

Глава двадцатая

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

20.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расчет вакуумной системы сложного технологического оборудования выполняется, как правило, в два этапа.

Проектный расчет, в результате которого определяются принципиальная схема вакуумной системы, ти-

пы и размеры насосов, коммутирующие элементы и ориентировочные размеры соединительных трубопроводов.

Поверочный расчет, в результате которого уточняются характеристики насосов, размеры трубопроводов и коммутирующих элементов, определяется время достижения заданного рабочего давления.

В качестве исходных величин для расчета обычно заданы *конечное давление в рабочей камере, поток газов, геометрические размеры рабочей камеры, характер технологического процесса, для осуществления которого предназначена установка, время достижения заданного давления.*

Часто при расчете вакуумной системы приходится определять поток газов, поступающих в нее. Для этого должны быть известны исходные характеристики продукции, позволяющие рассчитать поток газов.

Проектный расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Исходя из заданных значений парциального и полного давлений, определяют типы насосов, обеспечивающие откачку рабочей камеры до заданного давления.

2. По заданному или найденному расчетом потоку газов выбирают конкретный типоразмер насоса, обеспечивающего откачку до заданного давления; на этом этапе расчета поток газов, откачиваемых насосом, принимают *постоянным* во времени.

3. Выбирают вспомогательные насосы и насосы предварительного разрежения. Обычно на этом этапе расчета вспомогательные насосы выбирают в соответствии с паспортными характеристиками основных насосов окончательной откачки.

4. Определяют принципиальную схему вакуумной системы, назначают ориентировочные размеры вакуумных трубопроводов, выбирают коммутирующие элементы, средства измерения давления и т. п.

5. Исходя из заданного времени предварительной откачки рабочей камеры, выбирают насос предварительного разрежения.

После проведения проектного расчета конструируют вакуумную систему. В процессе конструирования уточняют все размеры вакуумных трубопроводов, типоразмеры коммутирующих элементов и т. п.

Поверочный расчет выполняется в следующей последовательности:

1. В соответствии с окончательными размерами вакуумной системы рассчитывают значение эффективной быстроты откачки системы.

2. Рассчитывают время достижения заданного давления в рабочей камере, при этом учитывают кинетику газовыделения и натеканий. При отсутствии этих данных в задании на проектирование выполняется их расчет.

3. Рассчитывают время предварительной откачки; при этом учитывают предельное остаточное давление насоса предварительного разрежения, газовыделение и натекание, а также изменение быстроты действия насоса и проводимости трубопроводов в зависимости от давления.

В случае, если полученное в результате расчета время достижения требуемого конечного давления или предварительного разрежения превышает заданное, увеличивают проводимость соответствующего участка вакуумной системы за счет увеличения сечений трубопроводов или выбирают насос с большей быстротой действия.

При необходимости применения нестандартных элементов производят их конструирование и расчет.

С целью облегчения усвоения методики расчетов вакуумных систем и их элементов поясним их на примерах.

20.2. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ, ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОТКАЧКИ И ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Пример 20.1. Рассчитать длительность откачки рабочей камеры технологической установки от атмосферного давления $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па до $p = 5,32$ Па.

Размеры откачиваемой камеры и вакуумной магистрали предварительного разрежения указаны на рис. 20.1.

Предварительная откачка рабочей камеры осуществляется механическим вакуумным насосом.

Суммарное газовыделение со стенок вакуумной системы примем равным $Q' = 2,43 \cdot 10^{-4}$ м³·Па/с и постоянным во времени, так как предварительная откачка кратковременна.

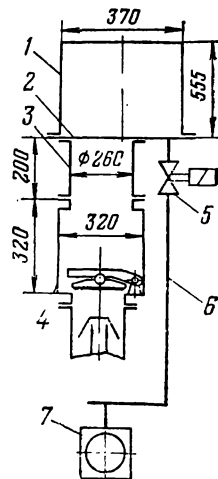
1. Определяем границы режимов течения газа в трубопроводе предварительного разрежения.

а) Граница между вязкостным и молекулярно-вязкостным режимами [см. (2.19)]

$$p_{\text{в.м.в}} = \frac{1,33}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 41,6 \text{ Па.}$$

Рис. 20.1. К примеру расчета длительности откачки.

1 — рабочая камера; 2 — плита; 3 — соединительный патрубок; 4 — затвор высоковакуумного насоса; 5 — электромагнитный клапан ДУ-32; 6 — трубопровод системы предварительного разрежения ($d_{\text{вн}} = 32$ мм, $l = 1040$ мм); 7 — механический вакуумный насос.



б) Граница между молекулярно-вязкостным и молекулярным режимами [см. (2.17)]

$$p_{\text{м-в.м}} = \frac{0,02}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 0,624 \text{ Па.}$$

2. Рассчитываем длительность откачки в диапазоне давлений от атмосферного до 41,6 Па, в котором быстрота действия механического вакуумного насоса* постоянна и равна $S_{\text{н}} = 5,8$ л/с (см. рис. 19.2), а проводимость трубопровода гораздо больше быстроты действия насоса. Поэтому время откачки сосуда от атмосферы до $1,33 \cdot 10^2$ Па подсчитываем по формуле (2.24), в которой полагаем $S_0 = S_{\text{н}}$; $Q'_S = 0$, так как газовыделение в этой области давлений можно не учитывать.

а) Откачиваемый сосуд состоит из объемов колпака 1, соединительного патрубка 3 и корпуса затвора 4:

$$V_{\Sigma} = V_{\text{колп}} + V_{\text{патр}} + V_{\text{затв}} = \frac{\pi}{4} (370^2 \cdot 555 + 260^2 \cdot 200 + 320^2 \cdot 320) \cdot 10^{-9} = 96 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

б) Найдем время откачки, полагая показатель политропы $n = 1,2$ (для воздуха):

$$t_{1,01 \cdot 10^5 \rightarrow 41,6} = \frac{96}{5,8} \ln \frac{(1,01 \cdot 10^5)^{\frac{1}{1,2}}}{41,6^{\frac{1}{1,2}}} = 107,5 \text{ с.}$$

3. Рассчитаем длительность откачки в диапазоне давлений от 41,6 до 5,32 Па, разбивая этот диапазон на следующие участки:

I — от 41,6 до 20 Па;

II — от 20 до 10 Па;

III — от 10 до 5,32 Па;

причем при расчете длительности откачки на III участке будем пользоваться формулой (2.23), учитывающей предельное остаточное давление насоса и газовыделение стенок вакуумной системы.

* Зависимость быстроты действия насоса $S_{\text{н}}$ от давления обычно приводится в его паспорте.

а) В диапазоне давлений от 41,6 до 20 Па (I участок), т. е. при среднем по времени давлении

$$\bar{p} = \frac{41,6 + 20}{2} = 30,8 \text{ Па},$$

проводимость трубопровода рассчитывается по формуле (18.33) с учетом того, что эффективная длина трубопровода равна:

$$l_{\text{расч}} = 104 + 1,33 \cdot 2 \cdot 3,2 = 112,5 \text{ см} = 1,125 \text{ м};$$

$$U_{\text{м-в.тр}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^4}{1,125} 30,8 + \\ + \left(\frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 30,8}{1 + 2,35 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 30,8} \right) 1,21 \cdot 10^2 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^3}{1,125} = \\ = 4,19 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проводимость электромагнитного клапана ДУ-32 длиной $l = 120$ мм при давлении 30,8 Па рассчитывается по формуле (18.12), в которую входят значения проводимости этого же клапана при молекулярном и вязкостном режимах, подсчитанные в примере 18.1 ($U_{\text{м.кл}} = 9,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и $U_{\text{в.кл}} = 9,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$):

$$U_{\text{м-в.кл}} = 9,2 \cdot 10^{-3} + \frac{9,7 \cdot 10^{-2} - 9,2 \cdot 10^{-3}}{41,6 - 0,624} (30,8 - 0,624) = \\ = 73,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проводимость всей магистрали при давлении 30,8 Па определяется по формуле (2.6):

$$\frac{1}{U_{\text{общ}}} = \frac{1}{4,19 \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{73,8 \cdot 10^{-3}} = 2,67 \cdot 10^{-2} \text{ с/м}^3, \\ \text{и } U_{\text{общ}} = 2,67 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

б) Быстроту действия насоса S_n берем по кривой $S_n = f(p)$ (см. рис. 19.2) при давлении 30,8 Па:

$$S_n \approx 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Эффективная быстрота откачки S_o в соответствии с (2.9) равна:

$$S_o = \frac{5,0 \cdot 10^{-3} \cdot 3,26 \cdot 10^{-2}}{5,0 \cdot 10^{-3} + 3,26 \cdot 10^{-2}} \approx 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

в) Рассчитываем время откачки на I участке по формуле (2.23), причем газовыделением по-прежнему пренебрегаем:

$$t_{41,6 \rightarrow 20} = \frac{9,6 \cdot 10^{-2}}{4,3 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{41,6}{20} = 16,3 \text{ с}.$$

г) В диапазоне давлений от 20 до 10 Па (II участок), т. е. при среднем давлении $\bar{p} = \frac{20 + 10}{2} = 15 \text{ Па}$, проводимость трубопровода рассчитывается по формуле (18.33) с учетом, что эффективная длина трубопровода, рассчитываемая по формуле (18.36), равна:

$$l_{\text{расч}} = 104 + 1,33 \cdot 2 \cdot 3,2 = 112,5 \text{ см} = 1,125 \text{ м};$$

$$U_{\text{м.в.тр}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^4}{1,125} 15 + \left(\frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 15}{1 + 2,35 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 15} \right) \times \\ \times 1,21 \cdot 10^2 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^3}{1,125} = 2,13 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проводимость электромагнитного клапана ДУ-32 при давлении 15 Па рассчитывается так же, как в примере 18.1, и равна $4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$.

Проводимость всей магистрали при давлении 15 Па определяется по формуле (2.6):

$$\frac{1}{U_{\text{общ}}} = \frac{1}{2,13 \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{4,0 \cdot 10^{-2}} = \frac{1}{1,39 \cdot 10^{-2}} \text{ с/м}^3$$

$$\text{и } U_{\text{общ}} = 1,39 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

д) Быстроту действия насоса S_n при 15 Па берем по кривой $S_n = f(p)$ (см. рис. 19.2), равной $S_n \approx 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Эффективная быстрота откачки S_o в соответствии с (2.9) равна:

$$S_o = \frac{4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,39 \cdot 10^{-2}}{4,5 \cdot 10^{-3} + 1,39 \cdot 10^{-2}} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

е) Рассчитаем время откачки на II участке по формуле (2.23), пренебрегая газовыделением:

$$t_{20 \rightarrow 10} = \frac{196 \cdot 10^{-3}}{3,4 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{20}{10} = 19,6 \text{ с}.$$

ж) Для III участка давлений аналогично предыдущему получим:

$$\bar{p} = \frac{10 + 5,32}{2} = 7,66 \text{ Па};$$

$$U_{\text{м.в.тр}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^4}{1,125} 7,66 +$$

$$+ \left(\frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 7,66}{1 + 2,35 \cdot 10^4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 7,66} \right) 1,21 \cdot 10^2 \frac{(3,2 \cdot 10^{-2})^3}{1,125} = \\ = 12,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{\text{м.в.кл}} = 9,2 \cdot 10^{-3} + \frac{9,7 \cdot 10^{-2} - 9,2 \cdot 10^{-3}}{41,6 - 0,624} (7,66 - 0,624) = \\ = 2,43 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\frac{1}{U_{\text{общ}}} = \frac{1}{12,56 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2,43 \cdot 10^{-2}} = \frac{1}{8,28 \cdot 10^{-3}} \text{ с/м}^3;$$

$$U_{\text{общ}} = 8,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$S_n \approx 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$S_o = \frac{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 8,28 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-3} + 8,28 \cdot 10^{-3}} = 1,34 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

При расчете времени откачки на этом участке учтем предельное остаточное давление, достигаемое в вакуумной системе, которое в нашем случае равно:

$$p_{\text{ост}} = Q'_{\text{газ}}/S_0 + p_{\text{пред}},$$

где $Q'_{\text{газ}}$ — газовыделение со стенок вакуумной системы, равное по условию $2,43 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$;

S_0 — эффективная быстрога откачки;

$p_{\text{пред}}$ — предельное остаточное давление механического вакуумного насоса, равное 3,06 Па (приводится в его паспорте).

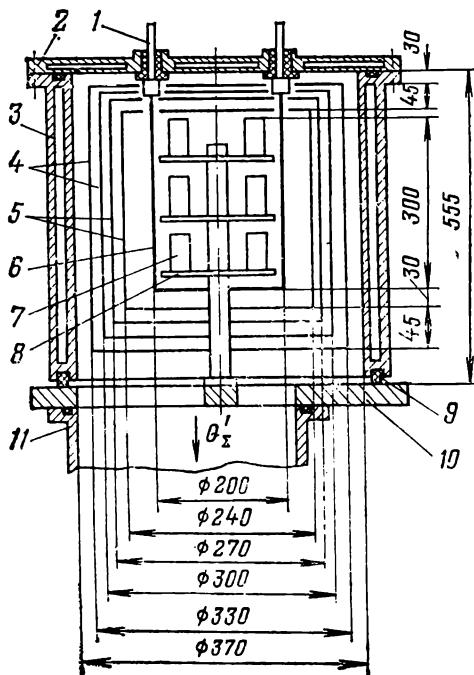


Рис. 20.2. Рабочая камера электрической печи отжига.

1 — медные водоохлаждаемые электроды (площадь поверхности $A_{\text{эл}} = 0,1320 \text{ м}^2$); 2 — водоохлаждаемая крышка из нержавеющей стали (площадь поверхности $A_{\text{кр}} = 0,1075 \text{ м}^2$); 3 — водоохлаждаемый колпак из нержавеющей стали (площадь поверхности $A_{\text{кол}} = 0,6450 \text{ м}^2$); 4 — внешние тепловые экраны из никеля (площадь поверхности $A_{\text{эк.ник}} = 2,0706 \text{ м}^2$); 5 — внутренние тепловые экраны из молибдена (площадь поверхности $A_{\text{эк.мол}} = 1,4960 \text{ м}^2$); 6 — молибденовый нагреватель (площадь поверхности $A_{\text{нагр}} = 0,4460 \text{ м}^2$); 7 — изделие (площадь поверхности $A_{\text{изд}} = 0,1550 \text{ м}^2$); 8 — подставка для изделия из нержавеющей стали (площадь поверхности $A_{\text{под}} = 0,1269 \text{ м}^2$); 9 — резиновый уплотнитель (суммарная площадь поверхности резиновых уплотнений $A_{\text{рез}} = 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$); 10 — нижняя водоохлаждаемая плита из нержавеющей стали (площадь поверхности $A_{\text{пл}} = 0,1130 \text{ м}^2$); 11 — патрубок высоковакуумной системы.

В результате время откачки сосуда на участке III в соответствии с формулой (2.23) будет равно:

$$t_{10 \rightarrow 5,32} = \frac{96 \cdot 10^{-3}}{1,34 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{10 - 3,24}{5,32 - 3,24} = 82,6 \text{ с.}$$

5. Суммарная длительность откачки рабочей камеры технологической установки от атмосферного давления до 5,32 Па равна:

$$t_{\Sigma} = 107,5 + 16,3 + 19,6 + 82,6 = 226 \text{ с.}$$

Пример 20.2. Рассчитать газовый поток, поступающий в вакуумную систему электрической печи отжига (рис. 20.2). Печь вакуумного отжига камерная, с поднимающимся водоохлаждаемым колпаком 3 из нержавеющей стали, внутри которого смонтированы молибденовый листовой нагреватель 6 и тепловые экраны 4 и 5. Два внутренних экрана 5 изготовлены из молибдена, а два внешних экрана 4 — из никеля.

Нагреватель 6 закреплен на медных водоохлаждаемых электродах 1. Рабочий объем печи снизу ограничен водоохлаждаемой плитой 10 из нержавеющей стали. На плите установлена подставка 8 для изделий 7. В качестве уплотнителей в разборных соединениях камеры применена резина марки 7889.

Отжигаемые в печи изделия в количестве 12 шт. представляют собой цилиндры из малоуглеродистой стали диаметром $\varnothing 35$ мм и высотой $h=100$ мм.

Отжиг ведется при температуре 1273 К в течение 6 ч.

Все необходимые для расчета размеры рабочей камеры печи отжига указаны на рисунке.

Расчет потока газов, поступающих в вакуумную систему, ведется по формуле (2.26).

1. Определяем по формуле (2.27) поток газов $Q'_{\text{изд}}$, выделяющихся из изделий.

Массу деталей найдем по формуле

$$G = \frac{\pi}{4} d^2 h \rho i, \text{ кг,}$$

где d — диаметр изделий, м;

h — высота изделий, м;

ρ — плотность, кг/м³;

i — количество изделий; $i=12$;

$$G = \frac{\pi}{4} (3,5 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 10 \cdot 10^{-2} \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 12 = 9 \text{ кг.}$$

Коэффициент неравномерности газовыделения Ω берем равным 2 ввиду длительности процесса отжига.

Количество газов $q_{\text{изд}}$, выделяющихся из 1 кг материала изделий, находим из приложения 8, суммируя соответствующие величины по температурам:

$$q_{\text{изд}} = 8,87 \cdot 10^{-4} + 2,87 \cdot 10^{-3} + 1,27 \cdot 10^{-2} + 1,53 \cdot 10^{-1} + \\ + 1,78 \cdot 10^{-1} + 1,15 \cdot 10^{-1} + 2,16 \cdot 10^{-1} = 6,8 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3 / (\text{Па} \cdot \text{кг}).$$

В результате

$$Q'_{\text{изд}} = \frac{9,0 \cdot 6,8 \cdot 10^{-1} \cdot 2}{3600 \cdot 6} = 5,69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с.}$$

Окончательно после приведения к комнатной температуре (293 К) получим:

$$Q'_{\text{взд}} = 5,69 \cdot 10^{-4} \frac{293}{273} \approx 6,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}.$$

2. Определяем по формуле (2.28) поток газов $Q'_{\text{газ}}$, выделяющихся с поверхности элементов, обращенных в сторону вакуумной системы. Величины удельных газовыделений $q'_{\text{газ}}$ берем из приложения 7 после 1 или 2 ч откачки, а для резины по рис. 17.3:

$$\begin{aligned} Q'_{\text{газ}} = & Q'_{\text{газ.эл}} + Q'_{\text{газ.кр}} + Q'_{\text{газ.колп}} + Q'_{\text{газ.экр.мол}} + \\ & + Q'_{\text{газ.экр.ник}} + Q'_{\text{газ.нагр}} + Q'_{\text{газ.изд}} + Q'_{\text{газ.подст}} + \\ & + Q'_{\text{газ.рез}} + Q'_{\text{газ.ил}} = 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 1320 \cdot 10^{-4} + 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot 1075 \cdot 10^{-4} + \\ & + 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot 6450 \cdot 10^{-4} + 8,5 \cdot 10^{-6} \cdot 20706 \cdot 10^{-4} + 8 \cdot 10^{-6} \cdot 14960 \cdot 10^{-4} + \\ & + 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot 4460 \cdot 10^{-4} + 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1550 \cdot 10^{-4} + \\ & + 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot 1269 \cdot 10^{-4} + 5,3 \cdot 10^{-5} \cdot 74 \cdot 10^{-4} + 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot 1130 \cdot 10^{-4} = \\ & = 2,252 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}. \end{aligned}$$

3. Рассчитаем газовый поток через неплотности в местах соединения узлов рабочей камеры установки. Полагая число возможных мест натеканий равным 15 и считая, что проверка осуществлялась масс-спектрометрическим течеискателем с чувствительностью $7 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, получаем:

$$Q'_{\text{нат}} = 7 \cdot 10^{-13} \cdot 15 \approx 1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}.$$

4. Суммарный газовый поток, поступающий в вакуумную систему электрической печи отжига,

$$Q'_{\Sigma} = 6,1 \cdot 10^{-4} + 2,25 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-11} \approx 8,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}.$$

Таблица 20.1

Скорости удельного и общего газовыделения с поверхности медных элементов при комнатной температуре (293 К) в зависимости от длительности откачки

Длительность откачки, с	Скорость удельного газовыделения, $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Скорость общего газовыделения, $\text{м}^3 \cdot \text{Па/с}$
2000	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$3,39 \cdot 10^{-6}$
3000	$2,02 \cdot 10^{-5}$	$2,67 \cdot 10^{-6}$
4000	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$2,10 \cdot 10^{-6}$
5000	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,65 \cdot 10^{-6}$
6000	$9,86 \cdot 10^{-6}$	$1,30 \cdot 10^{-6}$
8000	$6,11 \cdot 10^{-6}$	$8,06 \cdot 10^{-7}$
10 000	$3,78 \cdot 10^{-6}$	$4,99 \cdot 10^{-7}$
12 000	$2,29 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{-7}$
15 000	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,52 \cdot 10^{-7}$
18 000	$5,57 \cdot 10^{-7}$	$7,35 \cdot 10^{-8}$
20 000	$3,45 \cdot 10^{-7}$	$4,55 \cdot 10^{-8}$
21 600	$2,35 \cdot 10^{-7}$	$3,10 \cdot 10^{-8}$

Пример 20.3. Определить скорость газовыделения с медных поверхностей вакуумной камеры, имеющих площадь 1320 см^2 и находящихся при комнатной температуре во время откачки в течение 6 ч.

1. Рассчитаем по формуле (2.32) скорости удельного газовыделения медных поверхностей, принимая величины констант для протравленной и промытой в бензоле и ацетоне меди (см. приложение 7):

$$\lg q'_{\text{газ}} = -4,382 - 1,04 \cdot 10^{-4} t.$$

Затем по формуле (2.28) определяем суммарную скорость газовыделения.

Результаты расчета сводим в табл. 20.1

Пример 20.4. Рассчитать скорость газовыделения при комнатной температуре с поверхностей вакуумной камеры, изготовленной из нержавеющей стали площадью 8655 см^2 , во время откачки, продолжающейся 6 ч

Расчет произведем, используя данные приложения 7 для нержавеющей стали по формуле (2.32):

$$\lg q'_{\text{газ}} = -3,467 - 4,25 \cdot 10^{-5} t.$$

Суммарную скорость газовыделения определяем по формуле (2.28) и результаты сводим в табл. 20.2.

Таблица 20.2

**Скорости удельного и общего газовыделения
с поверхности рабочей камеры из нержавеющей
стали при комнатной температуре (293 К) в
зависимости от длительности откачки**

Длительность откачки, с	Скорость удельного газовыделения, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Скорости общего газовыделения, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$
2000	$2,80 \cdot 10^{-4}$	$2,42 \cdot 10^{-4}$
3000	$2,54 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$
4000	$2,31 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-4}$
5000	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$
6000	$1,90 \cdot 10^{-4}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$
8000	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$
10 000	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-4}$
12 000	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$9,09 \cdot 10^{-5}$
15 000	$7,86 \cdot 10^{-5}$	$6,80 \cdot 10^{-5}$
18 000	$5,86 \cdot 10^{-5}$	$5,07 \cdot 10^{-5}$
20 000	$4,82 \cdot 10^{-5}$	$4,17 \cdot 10^{-5}$
21 600	$4,12 \cdot 10^{-5}$	$3,56 \cdot 10^{-5}$

Пример 20.5. Рассчитать скорость газовыделения в течение откачки длительностью 6 ч уплотнителей вакуумной камеры, выполненных из резины марки 7889, имеющих суммарную площадь 74 см^2 и нагреваемых до температуры 343 К за счет излучения нагревателей.

Скорость удельного газовыделения с поверхности резиновых уплотнителей принимаем по данным рис. 17.3 и результаты расчета сводим в табл. 20.3.

**Скорость удельного и общего газовыделения с
поверхностей резиновых уплотнителей в зависимости
от длительности откачки**

Длительность откачки, с	Скорость удельного газова- выделения, м ³ ·Па/(м ² ·с)	Скорость общего газова- выделения, м ³ ·Па/с
2000	$2,614 \cdot 10^{-4}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$
3000	$2,521 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-6}$
4000	$2,428 \cdot 10^{-4}$	$1,80 \cdot 10^{-6}$
5000	$2,335 \cdot 10^{-4}$	$1,73 \cdot 10^{-6}$
6000	$2,241 \cdot 10^{-4}$	$1,66 \cdot 10^{-6}$
8000	$2,056 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-6}$
10 000	$1,868 \cdot 10^{-4}$	$1,38 \cdot 10^{-6}$
12 000	$1,684 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$
15 000	$1,428 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-6}$
18 000	$1,260 \cdot 10^{-4}$	$9,33 \cdot 10^{-7}$
20 000	$1,148 \cdot 10^{-4}$	$8,49 \cdot 10^{-7}$
21 600	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$7,85 \cdot 10^{-7}$

Пример 20.6. Определить время, необходимое для откачки камеры с внутренним диаметром 260 мм и высотой 250 мм, изготовленной из малоуглеродистой стали, до давления $p_1 = 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па. Суммарная площадь поверхности фторопластовых уплотнителей, обращенных в вакуумную полость, равна 50 см². Эффективная быстрота откачки вакуумной системы при давлении 6,65·10⁻³ Па равна $S_0 = 1 \cdot 10^{-2}$ м³/с.

Площадь поверхности металлических стенок камеры будет:

$$A_{\text{мет}} = 2\pi \cdot 26^2/4 + \pi \cdot 26 \cdot 25 = 3100 \text{ см}^2 = 0,31 \text{ м}^2.$$

Умножив соответствующие ординаты кривой рис. 17.1 на 0,31 м² и кривой рис. 17.2 на 0,005 м², получим кривые скорости газовыделения в камере (кривые 2 и 3 на рис. 20.3). Сложим ординаты полученных кривых и построим кривую 1 скорости суммарного газоваыделения.

Поток газов, удаляемых вакуумной системой при давлении $p_1 = 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па, равен:

$$Q' = p_1 S_0 = 6,65 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2} = 6,65 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Теперь через точку $Q' = 6,65 \cdot 10^{-5}$ м³·Па/с на оси ординат проведем горизонталь до пересечения с кривой 1 скорости суммарного газоваыделения. В результате получим, что давление $p_1 = 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па будет достигнуто примерно через 2,4 ч.

Пример 20.7. Рассчитать поток газов, выделяющихся из деталей цилиндрической формы диаметром 35 мм и высотой $h = 100$ мм, изготовленных из малоуглеродистой стали (плотность $7,8 \cdot 10^3$ кг/м³), во время обезгаживания их в электрической вакуумной печи при температуре 1273 К в течение 6 ч (21 600 с). Количество деталей равно 12 шт.

Расчет потока газов, выделяющихся из нагретых деталей, ведется по формуле (2.28), причем скорость удельного газоваыделения 396

q' определяется в нашем случае (детали — цилиндры) выражениями (4.21) или (4.23).

Таким образом, для расчета скорости удельного газовыделения необходимо определить коэффициенты диффузии D и начальные концентрации газа c_0 в материале изделий.

1. Определяем коэффициенты диффузии для системы «железо — газ» при температуре 1273 К.

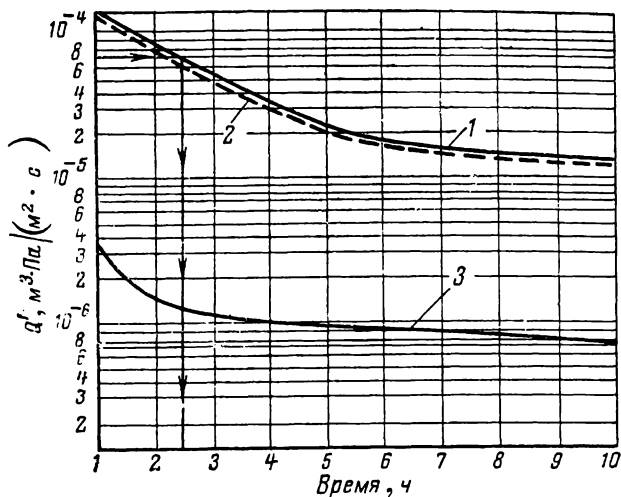


Рис. 20.3. Газовыделение вакуумной камеры.

1 — суммарное газовыделение со стенок камеры и уплотнителя; 2 — газовыделение стенок камеры; 3 — газовыделение с поверхности уплотнителя, изготовленного из фторопласта.

В соответствии с данными приложения 5 коэффициенты диффузии для водорода, азота, кислорода и углерода при 1273 К будут, $\text{м}^2/\text{с}$:

$$D_{\text{H}_2} = 2,10 \cdot 10^{-8}; \quad D_{\text{N}_2} = 1,35 \cdot 10^{-11};$$

$$D_{\text{O}_2} = 7,50 \cdot 10^{-14}; \quad D_{\text{C}} = 2,00 \cdot 10^{-11}.$$

2. Определяем начальную концентрацию газа в материале изделий. Начальная концентрация (газосодержание) определяется с использованием формулы (4.25).

Поскольку сведения о начальной концентрации c_0 в малоуглеродистой стали отсутствуют, воспользуемся для ее определения данными по суммарному газовыделению соответствующих газов при прогреве в вакууме, приведенными в приложении 8.

Исходя из опыта, обычно считают, что при прогреве в вакууме твердых тел, не доведенных до расплавления, выделяется примерно 70% содержащихся в них газов.

Газовыделение водорода $q_{\text{газ}}$ из малоуглеродистой стали составляет:

$$\begin{aligned} q_{\text{газ}} &= 2,05 \cdot 10^{-2} + 2,04 \cdot 10^{-2} + 2,98 \cdot 10^{-2} + 3,7 \cdot 10^{-2} = \\ &= 1,08 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{кг}. \end{aligned}$$

Увеличив соответственно полученное значение $q_{\text{газ}}$ и отнеся его к 1 м³ материала изделия [см. формулу (4.25)], найдем начальное газосодержание водорода $c_{0\text{H}_2}$ в малоуглеродистой стали:

$$c_{0\text{H}_2} = 1,08 \cdot 10^{-1} \cdot 7,8 \cdot 10^3 \frac{100}{70} = 1,21 \cdot 10^3 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{м}^3.$$

Аналогично найдем начальное газосодержание азота и окиси углерода:

$$c_{0\text{N}_2} = 1,86 \cdot 10^{-1} \cdot 7,8 \cdot 10^3 \frac{100}{70} = 2,085 \cdot 10^3 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{м}^3;$$

$$c_{0\text{CO}} = 3,68 \cdot 10^{-1} \cdot 7,8 \cdot 10^3 \frac{100}{70} = 4,13 \cdot 10^3 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{м}^3.$$

3. Определяем скорость удельного газовыделения водорода. Для этого вначале, воспользовавшись выражением (4.22), определяем применимость формул (4.21) или (4.23):

$$t = \frac{\pi (3,5 \cdot 10^{-2})^2}{96 \cdot 2 \cdot 15 \cdot 10^{-8}} = 1,86 \cdot 10^3 \text{ с} \ll 21\,600 \text{ с}.$$

Таким образом, скорость удельного газовыделения водорода следует рассчитывать по формуле (4.23), после логарифмирования которой получим:

$$\ln q' = \ln \frac{2c_0 D}{d} + \frac{\pi}{4} + \frac{6D}{R^2} t.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \ln q'_{\text{H}_2} &= \ln \frac{1,21 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 15 \cdot 10^{-8}}{\frac{3,5}{2} 10^{-2}} + \frac{\pi}{4} - \\ &- \frac{6 \cdot 2 \cdot 15 \cdot 10^{-8}}{\left(\frac{3,5}{2} 10^{-2}\right)^2} t = \ln 1,49 \cdot 10^{-3} + 0,785 - 4,21 \cdot 10^{-4} t \end{aligned}$$

или

$$q'_{\text{H}_2} = 1,49 \cdot 10^{-3} e^{0,785 - 4,21 \cdot 10^{-4} t}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Результаты вычислений q'_{H_2} для различных времен сведем в табл. 20.4.

**Результаты вычислений скорости удельного
газовыделения в зависимости от длительности
обезгаживания**

Длитель- ность обез- гаживания, с	q'_{H_2} , м ³ ·Па/(м ² ·с)	q'_{N_2} , м ³ ·Па/(м ² ·с)	q'_{CO} , м ³ ·Па/(м ² ·с)	q'_{Σ} , м ³ ·Па/(м ² ·с)	$Q'_{изд}$, м ³ ·Па/с
2000	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$1,021 \cdot 10^{-4}$	$2,28 \cdot 10^{-4}$	$1,740 \cdot 10^{-3}$	$2,70 \cdot 10^{-4}$
3000	$9,23 \cdot 10^{-4}$	$8,357 \cdot 10^{-5}$	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$1,093 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$
4000	$6,06 \cdot 10^{-4}$	$7,208 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$8,391 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$
5000	$4,06 \cdot 10^{-4}$	$6,448 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$6,085 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$
6000	$2,62 \cdot 10^{-4}$	$5,868 \cdot 10^{-5}$	$1,31 \cdot 10^{-4}$	$4,517 \cdot 10^{-4}$	$7,01 \cdot 10^{-5}$
8000	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$5,078 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$2,778 \cdot 10^{-4}$	$4,30 \cdot 10^{-5}$
10 000	$4,89 \cdot 10^{-5}$	$4,528 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$1,952 \cdot 10^{-4}$	$3,02 \cdot 10^{-5}$
12 000	$1,91 \cdot 10^{-5}$	$4,128 \cdot 10^{-5}$	$9,18 \cdot 10^{-5}$	$1,522 \cdot 10^{-4}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$
15 000	$6,02 \cdot 10^{-6}$	$3,678 \cdot 10^{-5}$	$8,18 \cdot 10^{-5}$	$1,246 \cdot 10^{-4}$	$1,93 \cdot 10^{-5}$
18 000	$1,70 \cdot 10^{-6}$	$3,348 \cdot 10^{-5}$	$7,45 \cdot 10^{-5}$	$1,097 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-5}$
20 000	$7,60 \cdot 10^{-7}$	$3,168 \cdot 10^{-5}$	$7,06 \cdot 10^{-5}$	$1,030 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-5}$
21 600	$3,81 \cdot 10^{-7}$	$3,048 \cdot 10^{-5}$	$6,77 \cdot 10^{-5}$	$9,856 \cdot 10^{-5}$	$1,52 \cdot 10^{-5}$

4. Определяем скорость удельного газовыделения азота. Воспользовавшись выражением (4.22), определяем применимость формул (4.21) или (4.23):

$$t = \frac{\pi (3,5 \cdot 10^{-2})^2}{96 \cdot 1,55 \cdot 10^{-11}} = 2,58 \cdot 10^6 \gg 21\,600 \text{ с.}$$

Таким образом, скорость удельного газовыделения азота рассчитываем по формуле (4.21):

$$\begin{aligned} q'_{N_2} &= 2,085 \cdot 10^3 \left[\sqrt{\frac{1,55 \cdot 10^{-11}}{\pi t}} - \frac{1,55 \cdot 10^{-11}}{3,5 \cdot 10^{-2}} \right] = \\ &= \frac{4,62 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{t}} - 9,24 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}). \end{aligned}$$

Результаты вычислений q'_{N_2} для различных времен также сведен в табл. 20.4.

5. При подсчете скорости удельного газовыделения окиси углерода принимается, что она ограничивается процессом диффузии углерода к поверхности, где атомы углерода восстанавливают окисную пленку и выделяются в объем в виде молекул CO. Таким образом, расчеты ведем для системы «железо — углерод», для которой

$$t = \frac{(3,5 \cdot 10^{-2})^2}{96 \cdot 1,95 \cdot 10^{-11}} = 3,83 \cdot 10^6 \gg 21\,600 \text{ с.}$$

Тогда в соответствии с (4.21)

$$\begin{aligned} q'_{CO} &= 4,13 \cdot 10^3 \left[\sqrt{\frac{1,95 \cdot 10^{-11}}{\pi t}} - \frac{1,95 \cdot 10^{-11}}{3,5 \cdot 10^{-2}} \right] = \\ &= \frac{1,03 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{t}} - 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}). \end{aligned}$$

Результаты вычислений q'_{CO} сводим в табл. 20.4.

6. Суммируя для каждого значения времени t величины q'_{H_2} , q'_{N_2} и q'_{CO} , соответственно получаем величины q'_Σ для тех же времен.

7. Определяем поток газов из изделий.

а) Общая поверхность изделий будет равна:

$$A_{изд} = \left(\pi \cdot 3,5 \cdot 10 + \frac{\pi \cdot 3,5^2}{4} \cdot 2 \right) 12 = 1550 \text{ см}^2 = 1,55 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2.$$

б) Рассчитываем по формуле (2.28) поток газов и результаты расчетов для каждого момента времени сводим в табл. 20.4. На рис. 20.4 дан график $Q'_{изд} = f(t)$.

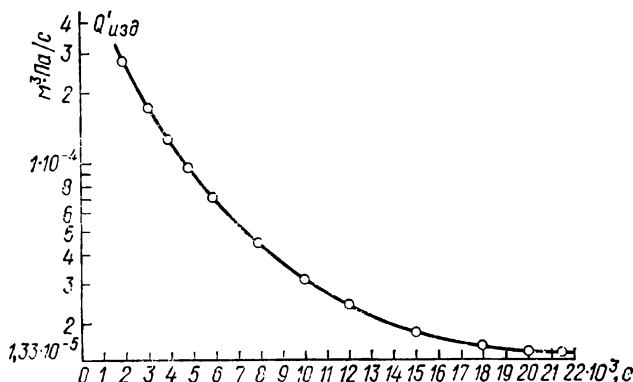


Рис. 20.4. Поток газов из изделий в зависимости от времени.

Пример 20.8. Рассчитать поток газов, диффундирующих из атмосферного воздуха в вакуумный сосуд через стакан из нержавеющей стали, нагретый до 1273 К. Размеры нагретой части стакана показаны на рис. 20.5.

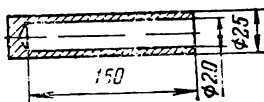


Рис. 20.5. Стакан из нержавеющей стали.

Рассчитаем по формуле (4.13) поток газов (водорода, азота и кислорода) через материал стакана для плоской стенки, считая толщину стенки равной

$$Z = \frac{25 - 20}{2} = 2,5 \text{ мм} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

и площадь поверхности стенки равной площади стакана по среднему его диаметру

$$A_{ст} = \frac{\pi (2,5 + 2,0)}{2} 15 = 106 \text{ см}^2 = 1,06 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Проницаемость газов для нержавеющей стали принимаем равной проницаемости соответствующих газов для железа.

1. Подсчитываем коэффициент проницаемости по водороду по формуле (4.11), выбирая значения константы проницаемости k_0 и энергии активации проницаемости E_{np} из приложения 6:

$$k_{np} = 1,88 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{8,04 \cdot 10^7}{2 \cdot 8,314 \cdot 10^3 \cdot 1272}} = 4,27 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Перепад давлений для водорода принимаем равным парциальному давлению его в воздухе (см. приложение 9), т. е.

$$p_{H_2} = 5,06 \cdot 10^{-2} \text{ Па}.$$

Тогда в соответствии с формулой (4.13) получим:

$$q'_{H_2} = 4,27 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{5,06 \cdot 10^{-2}}}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 3,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

2. Проницаемость по азоту

$$k_{np} = 5,19 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{1,996 \cdot 10^8}{2 \cdot 8,314 \cdot 10^3 \cdot 1273}} = 4,51 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Парциальное давление азота в воздухе

$$p_{N_2} = 7,9 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Тогда

$$q'_{N_2} = 4,51 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{7,9 \cdot 10^4}}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 5,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

3. Проницаемость по кислороду не учитываем из-за малой проницаемости его через нержавеющую сталь.

Общий поток газов через нагретый стакан

$$\begin{aligned} Q'_\Sigma &= (q'_{H_2} + q'_{N_2}) A = (3,84 \cdot 10^{-4} + 5,08 \cdot 10^{-3}) 1,06 \cdot 10^2 = \\ &= 5,46 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \end{aligned}$$

Пример 20.9. Рассчитать поток газов проникающих через уплотнитель, изготовленный из резины марки 7889 и имеющий площадь 74 см^2 и толщину 1 см при комнатной температуре (298 К).

1. Проницаемость резины 7889 для азота при 298 К в соответствии с данными приложения 6 при разности давлений 1 Па и толщине пластины 1 м равна $q' = 1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Учтя, что парциальное давление p_{N_2} азота в атмосфере равно $7,9 \cdot 10^4 \text{ Па}$ (см. приложение 9) и толщина уплотнителя Z равна 1 см , получим:

$$Q'_{N_2} = q'_{N_2} p_{N_2}^{1/2} \frac{A}{Z} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot 7,9 \cdot 10^4 \cdot \frac{7,4 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-2}} = 5,85 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

2. Проницаемость резины 7889 для кислорода принимаем равной проницаемости для кислорода натуральной резины. С помощью приложения 6 определяем значение проницаемости по уравнению (4.13), воспользовавшись значениями $k_0 = 8,86 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{м} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $E_{np} =$

$= 3,14 \cdot 10^7$ Дж/кмоль и значением парциального давления кислорода $p_{O_2} = 2,12 \cdot 10^4$ Па (см. приложение 9):

$$q'_{O_2} = \frac{8,86 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-4}} 2,12 \cdot 10^4 e^{-\frac{3,14 \cdot 10^7}{8,314 \cdot 10^3 \cdot 298}} = 5,89 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

Так как в нашем случае площадь уплотнителя равна 74 см^2 , то получим:

$$Q'_{O_2} = 5,89 \cdot 10^{-5} \cdot 7,4 \cdot 10^{-3} = 4,36 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Проницаемость уплотнителя по водороду, гелию и другим газам не рассматриваем ввиду незначительных их содержаний в атмосферном воздухе.

3. Общий газовый поток через резиновый уплотнитель будет равен:

$$Q'_{\Sigma} = 5,85 \cdot 10^{-7} + 4,36 \cdot 10^{-7} \approx 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

20.3. РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ОТЖИГА ДЕТАЛЕЙ ЭВП

В печи отжигаются детали цилиндрической формы диаметром 35 мм и высотой 100 мм в количестве 12 шт., изготовленные из малоуглеродистой стали.

Длительность отжига при температуре 1273 К составляет не более 6 ч.

Давление в рабочей камере при отжиге должно быть не более $1 \cdot 10^{-3}$ Па. Давление в конце процесса отжига — $6,6 \cdot 10^{-4}$ Па.

Длительность предварительной откачки рабочей камеры не более 5 мин.

Печь отжига камерная с поднимающимся колпаком, внутри которого смонтированы нагреватель и тепловые экраны.

Чертеж рабочей камеры вакуумной печи с необходимыми для расчета размерами изображен на рис. 20.2.

Проектный расчет

1. Исходя из заданного давления $p = 1 \cdot 10^{-3}$ Па, выбираем в качестве основного насоса пароструйный диффузионный насос, для нормальной работы которого необходимо предварительное разрежение порядка 1—10 Па.

Для создания указанного предварительного разрежения выбираем механический вакуумный насос с масляным уплотнением.

2. Так как в техническом задании отсутствует величина потока газов, рассчитаем ее.

Расчет суммарного потока газа в предположении, что он постоянен для рабочей камеры печи отжига, произведем нами в примере 20.2.

Общий поток газа, поступающий в вакуумную систему печи, равен:

$$Q'_{\Sigma} = 8,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с},$$

3. Определим необходимую эффективную быстроту откачки рабочей камеры печи:

$$S_0 = \frac{Q'_\Sigma}{p} = \frac{8,35 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-3}} = 0,83 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Эффективная быстрота откачки для вакуумных систем, оснащенных диффузионным насосом, обычно в 2 раза меньше быстроты действия насоса (см. § 19.1). В связи с этим выбираем высоковакуумный паромасляный диффузионный насос Н-250/2500, имеющий быстроту действия 1800 л/с (см. приложение 15).

4. Для создания предварительного разрежения в высоковакуумном насосе выбираем механический вакуумный насос 2НВР-5Д, который имеет среднюю быстроту действия 5 л/с в диапазоне давлений 10^5 — 10^2 Па (см. приложение 12).

5. Определяем принципиальную схему вакуумной системы печи (рис. 20.6).

Рабочая камера, 8, откачивается высоковакуумным диффузионным насосом 2 типа Н-250/2500 через затвор 1. Выпускной патрубок насоса 2 через форвакуумный баллон 3 и электромагнитный клапан 5 соединен с механическим вакуумным насосом 4 типа 2НВР-5Д.

Предварительная откачка рабочей камеры осуществляется тем же механическим насосом 4 через электромагнитный клапан 6. Для напуска воздуха в рабочую камеру перед подъемом колпака и в механический насос после его выключения предназначен электромагнитный клапан напуска 7. Для измерения давления в различных участках системы предусмотрены манометрические преобразователи 9 и 10.

6. Проверим возможность использования механического насоса 4 для предварительной откачки рабочей камеры, имеющей объем $V = 60$ л, за время $t = 5$ мин. Считаем, что предварительная откачка должна идти до давления 5,3 Па.

Так как заданное конечное давление в рабочей камере значительно больше предельного давления насоса 4, то в расчетах предельное давление учитывать не будем.

Рассчитаем по формуле (2.23) время предварительной откачки рабочей камеры. По формуле (19.1) с учетом того, что для механических насосов $\nu = 1,1 \div 1,25$, получим:

$$S_0 = \frac{1}{1,25} 5 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с},$$

Тогда

$$t = \frac{60 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{10^5}{5,3} = 148 \text{ с}.$$

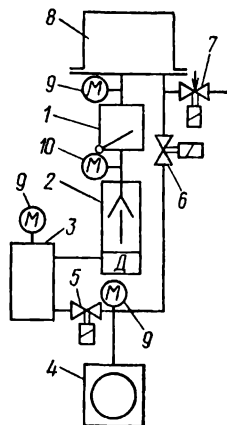


Рис. 20.6. Принципиальная схема вакуумной системы печи отжига.

Таким образом, полученное время предварительной откачки гораздо меньше заданного.

После определения принципиальной схемы и выбора типоразмеров насосов приступают к конструированию вакуумной системы и к поверочному расчету.

Поверочный расчет

1. Произведем уточненный расчет количества газов, поступающих в вакуумную систему, и построим кривую, характеризующую изменение потока газов во времени.

Основное количество газов поступает в вакуумную систему за счет диффузии из толщи материала изделий. Нагретые до температуры свыше 580—680 К элементы конструкции рабочей камеры вакуумной печи достаточно хорошо обезгаживаются во время нескольких первых тренировочных циклов отжига после изготовления установки и в дальнейшем служат источником выделения лишь физически адсорбированных на поверхностях газов в начале технологического цикла.

а) Рассчитаем поток газов, выделяющихся из изделий. Расчет ведем с учетом его изменения во времени по методике, изложенной в § 2.7.

Поток газов, выделяющихся из изделий, отжигаемых в рассчитываемой электрической печи, определен в примере 20.7 (см. табл. 20.4 и рис. 20.4). Заносим значения потока газов, выделяющихся из изделий, в графу 2 табл. 20.5.

б) Рассчитаем поток газов с поверхности элементов, расположенных в рабочей камере.

Так как скорость десорбции физически адсорбированных газов с поверхности экспоненциально зависит от температуры, то нагретые элементы выделяют эти газы практически полностью на начальном этапе технологического процесса отжига во время подъема температуры. Затем уровень газовой выделенности нагретых элементов становится постоянным и соответствует газовой выделенности отожженных в вакууме материалов.

Примем скорость удельного газовой выделенности с поверхностей нагретых элементов рабочей камеры (молибденовых и никелевых экранов, нагревателей и подставки) после высокотемпературного вакуумного отжига для всех материалов примерно одинаковой и равной

$$q'_{\text{газ}} = 6,66 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

лежащей в интервале скоростей удельных газовой выделенности для нержавеющей стали после отжига в вакууме при 673 К (см приложение 7).

Площадь поверхностей нагретых элементов возьмем из примера 20.2:

$$\begin{aligned} Q'_{\text{газ}} &= q'_{\text{газ}} (A_{\text{молиб.эк}} + A_{\text{ник.эк}} + A_{\text{нагр}} + A_{\text{подс}}) = \\ &= 6,66 \cdot 10^{-9} (1,496 + 2,0706 + 0,446 + 0,1269) = 2,76 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \end{aligned}$$

Газовыделение с поверхностей холодных элементов (медных электродов, колпака, крышки колпака, плиты, резиновых уплотнителей) переменено во времени.

Расчет газовой выделенности этих элементов проведен нами в примерах 20.3—20.5.

Для определения потока газов, поступающих в камеру печи с поверхностей холодных элементов, суммируем значения суммарно-

го газовыделения из таблиц 20.1—20.3 и заносим полученные величины в графу 3 таблицы 20.5.

в) Поток газов, связанный с натеканием в рабочую камеру, считаем постоянным и принимаем таким же, как и при проектном расчете (см. пример 20.2):

$$Q'_{\text{нат}} = 1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Как видно из сравнения $Q'_{\text{нат}}$ с другими источниками газовой деления, поток газов за счет натекания относительно невелик и практически не сказывается на общем потоке газов. Следует подчеркнуть, что получение такого весьма малого $Q'_{\text{нат}}$ можно достичь только тщательным изготовлением вакуумной системы установки.

Суммируем поток газов за счет натекания с потоком газов, выделяющихся с поверхностей нагретых элементов (см. п. «б»), и полученное значение заносим в графу 4 таблицы 20.5.

г) Рассчитаем поток газа за счет проницаемости материалов. Такой расчет необходимо производить в тех случаях, когда в конструкции вакуумной камеры имеются нагретые элементы, отделяющие вакуумную камеру от атмосферы

В рассматриваемой конструкции печи таким нагретым элементом, через который диффундируют газы, является стакан термопары, изготовленный из нержавеющей стали (см. рис. 20.5).

Расчет потока газов, проникающих через стенки стакана термопары, выполнен нами в примере 20.8 и равен:

$$Q'_{\text{ст}} = 5,46 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Расчет потока газов, проникающих из атмосферы через материал резиновых уплотнителей, рассчитан в примере 20.9 и равен:

$$Q'_{\text{рез.упл}} = 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Таблица 20.5

Общий поток газов, поступающих в вакуумную систему электрической печи отжига, и давление в ее рабочей камере

Длительность отжига, качки.	Поток газов из изделий, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$	Поток газов с поверхностей холодных элементов камеры печи, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$	Поток газов, натекающих в рабочую камеру через неплотности и поступающих с поверхности нагретых элементов, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$	Поток газов, проникающих в рабочую камеру, за счет проницаемости материалов, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$	Общий поток газов, поступающих в вакуумную систему, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$	Давление в рабочей камере, Па
2000	$2,70 \cdot 10^{-4}$	$2,474 \cdot 10^{-4}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$5,730 \cdot 10^{-4}$	$6,60 \cdot 10^{-4}$
3000	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$2,246 \cdot 10^{-4}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$4,652 \cdot 10^{-4}$	$5,36 \cdot 10^{-4}$
4000	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$2,039 \cdot 10^{-4}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$3,895 \cdot 10^{-4}$	$4,49 \cdot 10^{-4}$
5000	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$1,844 \cdot 10^{-4}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$3,460 \cdot 10^{-4}$	$3,90 \cdot 10^{-4}$
6000	$7,01 \cdot 10^{-5}$	$1,670 \cdot 10^{-4}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$2,927 \cdot 10^{-4}$	$3,37 \cdot 10^{-4}$
8000	$4,30 \cdot 10^{-5}$	$1,373 \cdot 10^{-4}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$2,359 \cdot 10^{-4}$	$2,72 \cdot 10^{-4}$
10 000	$3,02 \cdot 10^{-5}$	$1,129 \cdot 10^{-4}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$1,987 \cdot 10^{-4}$	$2,29 \cdot 10^{-4}$
12 000	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$9,245 \cdot 10^{-5}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$1,717 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$
15 000	$1,93 \cdot 10^{-5}$	$6,924 \cdot 10^{-5}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$1,442 \cdot 10^{-4}$	$1,66 \cdot 10^{-4}$
18 000	$1,70 \cdot 10^{-5}$	$5,170 \cdot 10^{-5}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$1,243 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-4}$
20 000	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$4,183 \cdot 10^{-5}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$1,134 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-4}$
21 600	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$3,644 \cdot 10^{-5}$	$2,761 \cdot 10^{-8}$	$5,562 \cdot 10^{-5}$	$1,074 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$

Таким образом, общий поток газов, обусловленный проницаемостью, равен:

$$Q'_{\Sigma \text{ прониц}} = Q'_{\text{ст}} + Q'_{\text{рез.упл}} = 5,562 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

д) Рассчитаем общий поток газа, просуммировав потоки газов, поступающих с нагретых и холодных элементов печи, за счет натекания и потока газа, обусловленного проницаемостью через нагретые стенки и резиновый уплотнитель. Результаты расчета общего потока газов, поступающих в вакуумную систему установки, представлены в графе 6 табл. 20.5.

Результат представим также в виде графика, изображенного на рис. 20.7.

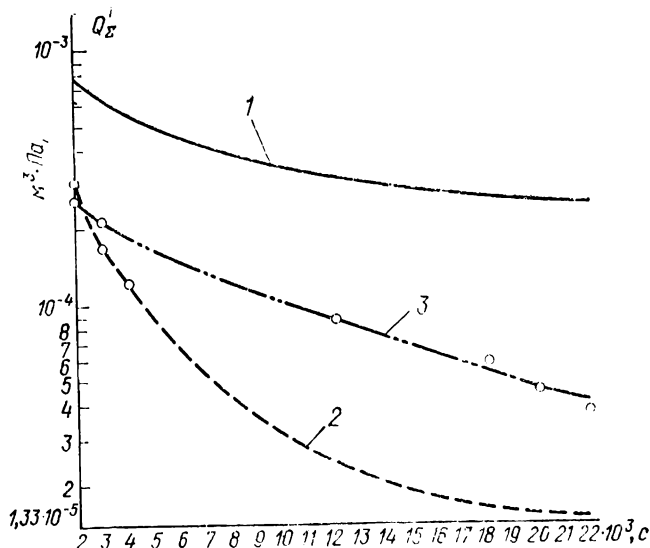


Рис. 20.7. Скорость изменения общего потока газов в зависимости от времени при температуре 1273 К.

1 — общий поток газов, поступающих в вакуумную систему; 2 — поток газов, поступающих из обрабатываемых (обезгаживаемых нагревом в вакууме) деталей; 3 — поток газов, поступающих с поверхностей холодных элементов; потоки газов, поступающих за счет натекания, проницаемости и с поверхности горячих элементов, приняты постоянными во времени.

2. Определяем проводимость высоковакуумной системы, состоящей из высоковакуумного насоса Н-250/2500 с затвором, соединительного патрубка с внутренним диаметром 260 мм и длиной 200 мм и диафрагмы, имеющей форму двух сегментов (см. рис. 18.4). Расчет проводимости высоковакуумной системы электрической печи отжига приведен нами в примере 18.2.

Проводимость высоковакуумной системы

$$U_{\text{общ}} = 1,677 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

3. Рассчитаем по уравнению (2.9) эффективную быстроту откачки рабочей камеры:

$$S_0 = \frac{1,8 \cdot 1,677}{1,8 + 1,677} = 0,868 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $S_0 = 1,8 \text{ м}^3/\text{с}$ — быстрота действия насоса Н-250/2500.

4. Рассчитаем по формуле (2.3) давление в рабочей камере в процессе отжига и в конце его. Результаты расчета сведем в табл. 20.5.

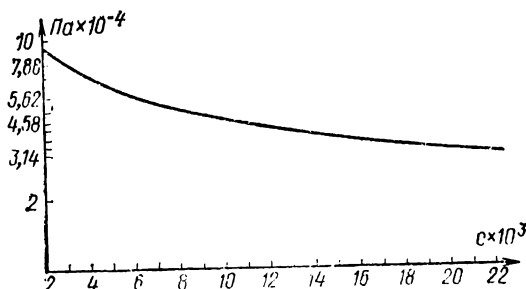


Рис. 20.8. Изменение давления в рабочей камере при температуре 1273 К в зависимости от времени откачки.

Как видно из табл. 20.5 и рис. 20.8, по истечении 2 ч с начала отжига давление становится около $3 \cdot 10^{-4}$ Па, а в конце отжига достигает $1,24 \cdot 10^{-4}$ Па. Таким образом, рассчитанная и сконструированная высоковакуумная система установки удовлетворяет требованиям технического задания.

5. Произведем поверочный расчет вакуумной системы предварительного разрежения.

Расчет вакуумной системы предварительного разрежения дан нами в примере 20.1. Длительность откачки рабочего сосуда составляет 226 с, что меньше заданного времени, равного 5 мин.

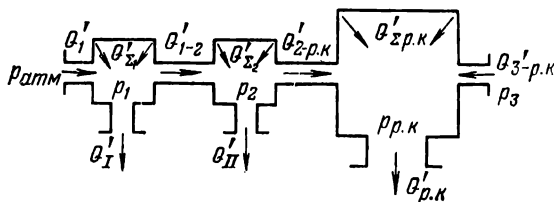


Рис. 20.9. Схема установки с открытой шлюзовой системой.

Q'_1 — поток газа, натекающего со стороны входного шлюза; Q'_{1-2} — поток газа, перетекающего из первого шлюза во второй; $Q'_{2-р.к.}$ — поток газа, перетекающего из второго шлюза в рабочую камеру; $Q'_{3-р.к.}$ — поток газа, перетекающего из третьего шлюза в рабочую камеру; $Q'_{\Sigma 1}, Q'_{\Sigma 2}, Q'_{\Sigma р.к.}$ — сум-

марные газовыделения в первом и втором шлюзах и в рабочей камере; $Q'_I, Q'_{II}, Q'_{р.к.}$ — потоки газов, удаляемых насосами первого и второго шлюзов и рабочей камеры; $P_{атм}, P_1, P_2, P_{р.к.}, P_3$ — атмосферное давление и давления в соответствующих участках вакуумной системы.

6. Проверим соответствие параметров механического вакуумного насоса 2НВР-5Д и паромасляного насоса Н-250/2500.

Такой расчет дан в примере 19.1 и показал, что выбранный при проектном расчете насос предварительного разрежения обеспечивает в выходном патрубке высоковакуумного насоса необходимое давление.

7. Проведем расчет форвакуумного баллона, в результате которого должны быть определены его геометрические размеры. Расчет форвакуумного баллона по данным рассчитываемой вакуумной системы приведен в примере 19.2.

Размеры форвакуумного баллона: диаметр — 210 мм, длина — 420 мм.

В заключение подчеркнем, что методика расчета любой вакуумной системы, в том числе и более сложной, например с несколькими параллельно работающими насосами, основывается на составлении баланса газовых потоков и определении газового потока, удаляемого средством откачки.

Характерный пример распределения потоков вакуумной системы технологической установки для нанесения тонких пленок в вакууме с открытыми шлюзовыми устройствами показан на рис. 20.9.

Расчет вакуумных систем шлюзовых камер и рабочей камеры в этом случае отличается от выше рассмотренного расчета лишь необходимостью учесть потоки газов, перетекающих из одной камеры в другую.

Приложение 1

Некоторые параметры газов

Газ или пар	$\lambda \cdot 10^8$ 273	$\sigma \cdot 10^{10}$	C	M	$m \cdot 10^{26}$	$u_a \cdot 10^{-3}$		$Nu \cdot 10^{-27}$	$M' \cdot 10^{-3}$	$\rho_{273}^{133} \cdot 10^3$	T	$\eta \cdot 10^6$
						273 K	298 K					
H ₂	11,04	2,75	84,4	2,016	0,3347	16,93	17,70	11,23	0,3759	0,116	192,3	0,666
											272,1	0,830
											273,1	0,842
											293,1	0,887
											524,5	1,298
He	17,53	2,18	80	4,003	0,6646	12,01	12,56	7,969	0,5297	0,235	15,6	0,272
											273,1	1,876
											293,1	1,970
											457,7	2,699
Ne	12,42	2,60	56	20,18	3,351	5,355	5,594	3,550	1,190	1,180	194,7	2,367
											273,1	2,973
											288,1	3,076
											717,6	5,584
Воз- дух	5,98	3,74	112	28,92	4,811	5,468	5,668	2,962	1,425	1,700	194,7	1,303
											273,1	1,709
											293,1	1,808
											573,1	2,946
O ₂	6,33	3,64	125	32,00	5,313	4,252	4,442	2,819	1,497	1,890	82	0,65
											273,1	1,92
											296,1	2,039
											458,9	2,885
Ar	6,20	3,67	142	39,94	6,631	3,805	3,976	2,523	1,675	2,350	273,1	2,096
											288,5	2,196
											373,5	2,688
											523,1	3,444
CO ₂	3,88	4,65	254	44,01	7,308	3,624	3,787	2,403	1,756	2,600	194,7	1,033
											273,1	1,380
											575,1	2,682
Kr	4,85	4,15	188	83,7	13,90	2,629	2,747	1,743	2,422	4,880	273,1	2,334
											289,4	2,459
											373,1	3,063
Xe	3,47	4,91	252	131,3	21,80	2,099	2,193	1,392	3,034	7,700	273,1	2,107
											288,4	2,222
											373,2	2,827
N ₂	5,99	—	102	28,02	4,652	4,542	4,745	3,011	1,402	1,640	195,6	1,273
											273,1	1,657
											289,2	1,728
											523,2	2,630

Газ или пар	$\lambda \cdot 10^8$ 273	$\sigma \cdot 10^8$	С	М	m · 10 ³	$u_a \cdot 10^{-3}$		Nu · 10 ⁻³	M' · 10 ⁻³	ρ_{273}^{133}	Т	$\eta \cdot 10^5$
						273 К	298 К					
H ₂ O	—	4,68	659	18,02	2,992	5,665	5,919	3,756	1,124	1,055	273,1 288,1 298,1	0,869 0,926 0,964

Обозначения: М—молекулярная масса, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$; m—масса молекулы, кг; С—постоянная, характеризующая интенсивность сил притяжения, действующих между молекулами (постоянная Сазерленда); $\lambda_{273}^{10^8}$ —средняя длина свободного пути молекулы, м, при давлении 10⁵ Па и температуре 273 К; σ —диаметр молекулы, м; ρ_{273}^{133} —плотность газа при давлении 133 Па и температуре 273 К, кг/м³; Т—абсолютная температура, К; u_a —средняя арифметическая скорость, м/с; Nu—число молекул, попадающих на 1 м² поверхности за 1 с при температуре 273 К и давлении 10⁵ Па; M'—масса газа, соответствующая Nu, кг/(м²·с); η —коэффициент динамической вязкости газа (или коэффициент внутреннего трения), Па·с.

Приложение 2

Растворимость газов в металлах

Газ	Металл	Растворимость s при 1 Па			Коэффициенты в уравнениях (4.1), (4.2)		
		Температура, К	м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³	$s_p, \frac{\text{м}^3 \times}{\text{Па}^{1/2} \times \text{кг}}$	$s_p, \frac{\text{м}^3 \times}{\text{Па}^{1/2} \times \text{м}^3}$	$E_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль}}$
H ₂	Fe	1373	2,2 · 10 ⁻³	1,75 · 10 ³	0,198	1,565 · 10 ³	5,06 · 10 ⁷
O ₂	Fe	1073	7,6 · 10 ⁻³	5,98 · 10 ³	0,2	1,58 · 10 ³	1,745 · 10 ⁷
N ₂	Fe	1113	1,45 · 10 ⁻³	1,149 · 10 ³	4,42 · 10 ⁷	3,49 · 10 ¹¹	4,22 · 10 ⁸
H ₂	Ni	573	7,4 · 10 ⁻³	66,1	8,67 · 10 ⁻³	7,73 · 10 ³	2,47 · 10 ⁷
H ₂	Нержавеющая сталь	673	9,86 · 10 ⁻³	79,1	5,74 · 10 ⁻³	45,9	1,97 · 10 ⁷
H ₂	Cu	673	2,1 · 10 ⁻⁴	1,87	0,181	1,62 · 10 ³	7,66 · 10 ⁷
O ₂	Cu	873	1,58 · 10 ⁻³	1,42 · 10 ³	0,136	1,22 · 10 ³	3,36 · 10 ⁷
H ₂	Mo	693	5,3 · 10 ⁻⁴	5,38	2,84 · 10 ⁻³	2,9 · 10 ³	5,86 · 10 ⁷
N ₂	Mo	1473	2,6 · 10 ⁻³	27,1	1,925	1,96 · 10 ⁴	1,613 · 10 ⁸
N ₂	W	1473	3,1 · 10 ⁻³	6,0	1,093	2,08 · 10 ⁴	3,12 · 10 ⁸
H ₂	Pt	682	2,1 · 10 ⁻⁴	4,55	0,603	1,294 · 10 ⁴	1,444 · 10 ⁸
H ₂	Ag	673	1,7 · 10 ⁻⁴	1,83	1,65 · 10 ⁻³	1,73 · 10 ³	4,99 · 10 ⁷
H ₂	Pd	573	0,52	5,91 · 10 ³	0,151	1,72 · 10 ³	9,63 · 10 ⁷

Примечание. Азот в Cu и Ag и водород в Al практически не растворяются.

Приложение 3

Растворимость газов в некоторых неметаллических материалах

Газ	Материал	Растворимость при 1 Па		
		Температура, К	м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³
H ₂	Каучук	298	3,76 · 10 ⁻⁵	3,83 · 10 ⁻²
O ₂	Каучук	298	9,77 · 10 ⁻⁵	9,77 · 10 ⁻²

Газ	Материал	Растворимость при 1 Па		
		Температура, К	м³·Па/кг	м³·Па/м³
N ₂	Каучук	298	$5,26 \cdot 10^{-5}$	$5,11 \cdot 10^{-2}$
CO ₂	Каучук	298	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$9,02 \cdot 10^{-2}$
He	Пирекс	773	$2,86 \cdot 10^{-6}$	$8,27 \cdot 10^{-3}$
H ₂	Кварц	573	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$6,01 \cdot 10^{-3}$
He	Фторопласт	293—353	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
H ₂	Фторопласт	293—353	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
N ₂	Фторопласт	293—353	$2,25 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$
O ₂	Фторопласт	293—353	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$

Приложение 4

Количество газов, содержащееся в сталях и сплавах

Материал	Газосодержание			
	Кислород		Азот	
	м³·Па/кг	м³·Па/м³	м³·Па/кг	м³·Па/м³
Сталь 12Х18Н10Т	2,25	$17,5 \cdot 10^3$	5,1	$40,3 \cdot 10^3$
Сплав Х20Н80	—	—	—	—
Сталь 10	9,0	$71 \cdot 10^3$	3,5	$27,6 \cdot 10^3$
Сталь 20	2,25	$17,6 \cdot 10^3$	3,44	$29 \cdot 10^3$
Электролитическое железо	7,5	$58,9 \cdot 10^3$	3,18	$25 \cdot 10^3$
Сталь У7	—	—	—	—
Сталь ШХ15	4,1	$32 \cdot 10^3$	—	—
Сталь ШХ15 после электро- дугового переплава	1,5	$11,7 \cdot 10^3$	—	—
Сталь 30ХГСА	3,0	$25,5 \cdot 10^3$	3,43	$27 \cdot 10^3$
Сталь электротехническая тонколистовая	12,9	$1 \cdot 10^5$	—	—
Сталь электротехническая тонколистовая после ва- куумной плавки	1,35	$12,7 \cdot 10^3$	—	—

Продолжение приложения 4

Материал	Газосодержание			
	Водород		Всего газов	
	м³·Па/кг	м³·Па/м³	м³·Па/кг	м³·Па/м³
Сталь 12Х18Н10Т	6,5—	(51,4—	13—18	$10,3 \cdot 10^4$ —
	11,0	$87) \cdot 10^3$		$14,3 \cdot 10^4$
Сплав Х20Н80	14,0	$11,7 \cdot 10^4$	—	—
Сталь 10	2,15	$17 \cdot 10^3$	14,65	$11,5 \cdot 10^4$
Сталь 20	2,15	$16,9 \cdot 10^3$	8,1	$63,5 \cdot 10^3$
Электролитическое железо	12,0	$94 \cdot 10^3$	22,68	$17,8 \cdot 10^4$
Сталь У7	—	—	3,2—4,3	(25,2—
				$33,8) \cdot 10^3$

Материал	Газосодержание			
	Водород		Всего газов	
	м³. Па/кг	м³. Па/м³	м³. Па/кг	м³. Па/м³
Сталь ШХ15	—	—	—	—
Сталь ШХ15 после электро- дугового переплава	—	—	—	—
Сталь 30ХГСА	1,3	$10,2 \cdot 10^3$	7,73	$60,6 \cdot 10^3$
Сталь электротехническая тонколистовая	0,0003	2,32	12,9	$1 \cdot 10^5$
Сталь электротехническая тонколистовая после ва- куумной плавки	0,00005	0,385	1,65	$12,7 \cdot 10^3$

Приложение 5

Коэффициенты диффузии газов в твердых телах

Газ	Металл	Коэффициент диффузии		Коэффициенты в уравнении (4.5)	
		Темпе- ратура, К	D , м²/с	D_0 , м²/с	E_d , Дж/кмоль
H ₂	Fe	1273	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$8,33 \cdot 10^7$
O ₂	Fe	1273	$7,5 \cdot 10^{-14}$	$3,92 \cdot 10^{-12}$	$8,38 \cdot 10^7$
CO	Fe	—	—	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,637 \cdot 10^8$
C	Fe	1273	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$4,26 \cdot 10^{-8}$	$4,06 \cdot 10^8$
N ₂	Fe	1273	$1,35 \cdot 10^{-11}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$2,85 \cdot 10^8$
H ₂	Нержавеющая сталь	1023	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$4,94 \cdot 10^7$
N ₂	Нержавеющая сталь	—	—	$1 \cdot 10^{-5}$	$5,66 \cdot 10^8$
CO	Нержавеющая сталь	—	—	$5 \cdot 10^{-5}$	$5,74 \cdot 10^8$
H ₂	Ni	398	$3,4 \cdot 10^{-12}$	$2,04 \cdot 10^{-7}$	$7,3 \cdot 10^7$
O ₂	Ni	1273	$2,36 \cdot 10^{-13}$	$1,89 \cdot 10^{-9}$	$6,78 \cdot 10^8$
CO	Ni	1223	$4 \cdot 10^{-12}$	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$1,98 \cdot 10^8$
C	Ni	—	—	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,75 \cdot 10^8$
H ₂	Cu	—	—	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,53 \cdot 10^8$
H ₂	Mo	—	—	$7,25 \cdot 10^{-8}$	$1,74 \cdot 10^8$
H ₂	W	550	10^{-12}	0,1	$2,3 \cdot 10^8$
H ₂	Pd	350	10^{-10}	$6,61 \cdot 10^{-5}$	$6,46 \cdot 10^7$
O ₂	Ti	1500	$5,65 \cdot 10^{-12}$	$4,7 \cdot 10^{-8}$	$2,18 \cdot 10^8$
O ₂	Cu	900	10^{-12}	$7,76 \cdot 10^{-6}$	$2,38 \cdot 10^8$
H ₂	SiO ₂	500	10^{-18}	$5,5 \cdot 10^{-10}$	$3,64 \cdot 10^7$
He	Пирекс	300	$8,1 \cdot 10^{-18}$	$2,58 \cdot 10^{-8}$	$2,59 \cdot 10^7$
He	Плавленый кварц	300	—	$3 \cdot 10^{-8}$	$2,34 \cdot 10^7$

Газ	Материал	Удельный поток проницаемости*		Коэффициенты в уравнении (4.13)	
		Темпе- ратура, К	$q',$ $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	k_0 $\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}^{(1-1/j)} \cdot \text{м}^{**}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$	$E_{\text{пр}},$ $\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль}}$
H_2	Fe	298	$1,7 \cdot 10^{-11}$	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$8,04 \cdot 10^7$
N_2	Fe	1095	$8,97 \cdot 10^{-9}$	$5,19 \cdot 10^{-4}$	$1,996 \cdot 10^8$
CO	Fe	965	$7,48 \cdot 10^{-9}$	$1,235 \cdot 10^{-4}$	$1,559 \cdot 10^8$
H_2	Ni	681	$7,58 \cdot 10^{-8}$	$1,368 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^8$
H_2	Pd	342	$7,8 \cdot 10^{-9}$	$4,59 \cdot 10^{-2}$	$8,87 \cdot 10^7$
H_2	Нержавеющая сталь	298	$7 \cdot 10^{-11}$	$5,05 \cdot 10^{-5}$	$6,91 \cdot 10^7$
H_2	Mo	871	$7,3 \cdot 10^{-9}$	$8,85 \cdot 10^{-4}$	$1,694 \cdot 10^8$
N_2	Mo	1635	$7,7 \cdot 10^{-9}$	$7,89 \cdot 10^{-3}$	$3,765 \cdot 10^8$
H_2	Cu	814	$7,7 \cdot 10^{-9}$	$2,189 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^8$
O_2	Ag	913	$7,7 \cdot 10^{-9}$	$1,958 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^8$
H_2	Pt	702	$7,0 \cdot 10^{-9}$	$7,74 \cdot 10^{-3}$	$1,619 \cdot 10^8$
H_2	Al	773	$7,7 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$2,58 \cdot 10^8$
He	Стекло жаропроч- ное	473	$\sim 10^{-13}$	$2,85 \cdot 10^{-11}$	$2,23 \cdot 10^7$
He	Кварц	423	$5,8 \cdot 10^{-13}$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^7$
H_2	Кварц	1173	$4,8 \cdot 10^{-12}$	$1,96 \cdot 10^{-10}$	$3,62 \cdot 10^7$
O_2	Кварц	1173	$6,8 \cdot 10^{-14}$	—	—
Ar	Кварц	1173	$4,4 \cdot 10^{-13}$	—	—
Ne	Кварц	873	$2,1 \cdot 10^{-13}$	$5,49 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^7$
Воз- дух	Керамика	1713	$3,9 \cdot 10^{-13}$	$1,43 \cdot 10^{-8}$	$1,49 \cdot 10^8$
He	Резина нату- ральная	298	—	$1,45 \cdot 10^{-6}$	$2,72 \cdot 10^7$
O_2		—	—	$8,85 \cdot 10^{-6}$	$3,14 \cdot 10^7$
H_2		—	—	$4,82 \cdot 10^{-6}$	$2,886 \cdot 10^7$
N_2	Резина 7889	298	$8,3 \cdot 10^{-12}$	$2,87 \cdot 10^{-7}$	$2,59 \cdot 10^7$
N_2	Резина 9024	298	$7,1 \cdot 10^{-13}$	$7,52 \cdot 10^{-4}$	$5,15 \cdot 10^7$
N_2	Резина ИРП-1015	298	$4,5 \cdot 10^{-13}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,97 \cdot 10^7$
N_2	Резина ИРП-1368	298	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$8,1 \cdot 10^{-9}$	$8,78 \cdot 10^8$
N_2	Резина ИРП-2043	298	$4,5 \cdot 10^{-13}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$	$4,23 \cdot 10^7$
H_2	Фторопласт-4	293	$7,89 \cdot 10^{-12}$	—	—
He	Фторопласт-4	293	$2,41 \cdot 10^{-11}$	—	—
N_2	Фторопласт-4	293	$8,27 \cdot 10^{-13}$	—	—
O_2	Фторопласт-4	295	$1,88 \cdot 10^{-12}$	—	—
H_2	Полиэтилен высо- кой плотности	323	$9,0 \cdot 10^{-12}$	—	—
H_2	Полиамид	323	$2,3 \cdot 10^{-12}$	—	—
N_2	Полиэтилентере- фталатная пленка толщиной 12 мкм	293	$2,3 \cdot 10^{-12}$	—	—
He	Полиэтилентере- фталатная пленка толщиной 12 мкм	293	$5,86 \cdot 10^{-11}$	—	—

* Удельные потоки проницаемости q' даны при давлении 1 Па и указан-
ных температурах для материала толщиной 1 м.

Для подсчета удельного потока q' при иных давлениях p и толщинах z
и той же температуре следует использовать уравнение $q' = q'_1 \frac{p^{1/j}}{z}$.

** $j=1$ для неметаллов; $j=2$ для металлов.

Скорость удельного газовыделения $q'_{\text{газ}}$ с поверхности металлов при комнатной температуре

Наименование материала	Предварительная обработка материала	Удельный поток газа, десорбирующегося с поверхности, $q'_{\text{газ}}$, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Длительность откачки, после которой производились измерения, ч	Коэффициенты в уравнении (2.32)	
				$A_{\text{дес}}$	$B_{\text{дес}}$
Малоуглеродистая сталь	—	$4,12 \cdot 10^{-4}$ $7,35 \cdot 10^{-5}$	1 6	—3,236 —	$4,16 \cdot 10^{-5}$ —
	После отжига в вакууме при 693 К	$4 \cdot 10^{-10}$ — $1,2 \cdot 10^{-8}$	Не изменяется во времени	—	—
Нержавеющая сталь	—	$2,4 \cdot 10^{-4}$ $4,12 \cdot 10^{-5}$	1 6	—3,467 —	$4,25 \cdot 10^{-5}$ —
	Необработанная	$1,7 \cdot 10^{-4}$ $1,97 \cdot 10^{-5}$	1 5	—3,396 —	$7,33 \cdot 10^{-5}$ —
	После отжига в вакууме при 673 К	$4 \cdot 10^{-10}$ — $1,2 \cdot 10^{-8}$	Не изменяется во времени	—	—
Медь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	$1,11 \cdot 10^{-5}$ $8,35 \cdot 10^{-7}$	1 5	—4,382 —	$1,04 \cdot 10^{-4}$ —
	Промывка в бензоле и ацетоне	$6,12 \cdot 10^{-5}$ $1,03 \cdot 10^{-5}$	1 5	—3,918 —	$5,85 \cdot 10^{-5}$ —
	Необработанная	$1,95 \cdot 10^{-4}$ $6,40 \cdot 10^{-5}$	1 5	—3,486 —	$3,98 \cdot 10^{-5}$ —
	После отжига в вакууме при 673 К	$1,06 \cdot 10^{-10}$ — $9,3 \cdot 10^{-9}$	Не изменяется во времени	—	—
Латунь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	$1,95 \cdot 10^{-5}$ $1,53 \cdot 10^{-6}$	1 5	—4,176 —	$9,16 \cdot 10^{-5}$ —
	Промывка в бензоле и ацетоне	$2,22 \cdot 10^{-4}$ $8,9 \cdot 10^{-6}$	1 5	—3,39 —	$3,7 \cdot 10^{-5}$ —
	Необработанная	$3,34 \cdot 10^{-4}$ $1,2 \cdot 10^{-4}$	1 5	—3,35 —	$3,14 \cdot 10^{-5}$ —
Дюралюминий	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	$4,73 \cdot 10^{-5}$ $3,9 \cdot 10^{-6}$	1 5	—3,946 —	$8,12 \cdot 10^{-5}$ —
	Промывка в бензоле и ацетоне	$2,8 \cdot 10^{-4}$ $1,4 \cdot 10^{-4}$	1 5	—3,231 —	$3,48 \cdot 10^{-5}$ —
	Необработанный	$5,57 \cdot 10^{-4}$ $1,9 \cdot 10^{-4}$	1 5	—3,256 —	$2,78 \cdot 10^{-5}$ —
Никель Молибден Вольфрам	Необработанный	$(6,5-8) \cdot 10^{-5}$	2	—	—
	То же	$(4,6-8,5) \cdot 10^{-6}$	2	—	—
	То же	$1,3 \cdot 10^{-6}$	2	—	—

Удельное газовыделение $q_{\text{газ}}$, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{кг}$

Металл	Температура, К	Общее	Водород	Азот	Оксид углерода
Медь	673	$4,22 \cdot 10^{-2}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$
	873	$1,03 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	1073	$3,04 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	1123	$3,24 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	1173	$3,69 \cdot 10^{-2}$	$6,04 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$2,96 \cdot 10^{-2}$
Ковар	673	$5 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	873	$9,67 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$0,292 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$
	1073	0,237	$3,33 \cdot 10^{-2}$	$0,396 \cdot 10^{-2}$	0,200
	1273	0,985	0,152	$0,79 \cdot 10^{-2}$	0,826
	1373	2,81	0,489	0,635	1,687
Молибден	673	$7,1 \cdot 10^{-2}$	—	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
	773	$5,411 \cdot 10^{-2}$	$3,42 \cdot 10^{-2}$	$0,164 \cdot 10^{-1}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$
	873	$4,25 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	973	$4,91 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$0,85 \cdot 10^{-2}$	$2,92 \cdot 10^{-2}$
	1073	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$8,77 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$
	1173	$5,36 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	1273	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$	$6,73 \cdot 10^{-3}$	$5,69 \cdot 10^{-2}$
	1373	$2,01 \cdot 10^{-1}$	$5,26 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$
	1473	$2,28 \cdot 10^{-1}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$	$2,00 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-1}$
	1573	$4,41 \cdot 10^{-1}$	$1,51 \cdot 10^{-1}$	$4,47 \cdot 10^{-2}$	$2,46 \cdot 10^{-1}$
	1673	$2,68 \cdot 10^{-1}$	$8,88 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-1}$
	1773	$3,05 \cdot 10^{-1}$	$1,57 \cdot 10^{-1}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$1,34 \cdot 10^{-1}$
Нержавеющая сталь	673	$3,7 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	873	0,235	0,216	$3,88 \cdot 10^{-3}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$
	1073	$8,56 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$3,94 \cdot 10^{-3}$	$2,67 \cdot 10^{-2}$
	1273	0,449	0,181	$5,13 \cdot 10^{-3}$	0,263
	1373	2,12	0,367	$1,96 \cdot 10^{-2}$	1,74
Малоуглеродистая сталь	673	$8,87 \cdot 10^{-4}$	—	—	—
	773	$2,87 \cdot 10^{-3}$	—	—	—
	873	$1,27 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	973	0,153	$2,05 \cdot 10^{-2}$	$7,45 \cdot 10^{-2}$	$5,86 \cdot 10^{-2}$
	1073	0,178	$2,04 \cdot 10^{-2}$	$6,36 \cdot 10^{-2}$	$9,40 \cdot 10^{-2}$
	1173	0,115	$2,98 \cdot 10^{-2}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$
	1273	0,216	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$3,65 \cdot 10^{-2}$	0,142
Никель	673	0,214	0,107	$8,59 \cdot 10^{-2}$	$9,66 \cdot 10^{-2}$
	873	0,244	—	—	—
	1073	$5,37 \cdot 10^{-2}$	$0,32 \cdot 10^{-2}$	$0,32 \cdot 10^{-2}$	$4,73 \cdot 10^{-2}$
	1273	0,147	$5,16 \cdot 10^{-2}$	$5,37 \cdot 10^{-2}$	$9,05 \cdot 10^{-2}$
	1473	7,75	—	$5,37 \cdot 10^{-2}$	7,70

Примечание. Удельное газовыделение указано для интервалов температур, так, например, для меди при нагревании от 293 (комнатная температура) до 673 К выделяется $4,22 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{кг}$, а при нагревании от 673 до 873 К выделяется дополнительно $1,03 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{кг}$.

Приложение 9

Состав атмосферного воздуха

Наименование	Состав, %	Парциальное давление, Па
N ₂	78,08	7,9·10 ⁴
O ₂	20,95	2,12·10 ⁴
Ar	0,93	9,32·10 ²
CO ₂	0,033	33,2
Ne	1,8·10 ⁻³	1,86
He	5,24·10 ⁻⁴	0,53
CH ₄	2·10 ⁻⁴	0,2
Kr	1,1·10 ⁻⁴	11,3·10 ⁻⁴
H ₂	5,0·10 ⁻⁵	5,06·10 ⁻²
N ₂ O	5,0·10 ⁻⁵	5,06·10 ⁻²
Xe	8,7·10 ⁻⁶	8,8·10 ⁻³
O ₃	7,0·10 ⁻⁶	7,05·10 ⁻³
H ₂ O	1,57	1,58·10 ⁻³

(50%-ная относительная влажность, 298 К)

Приложение 10

**Чувствительность вакуумметрических преобразователей
косвенного действия по разным газам относительно азота**

Преобразо- ватель	Газы											
	Воздух	N ₂	H ₂	He	Ne	Ar	Kr	Xe	O ₂	CO	CO ₂	CH ₄
ПМИ-2	1,0	1,00	0,43	0,16	0,27	1,29	—	2,82	0,85	1,02	—	1,52
ПМТ-2	1,0	1,00	0,67	1,12	1,31	1,56	2,30	—	—	0,97	0,94	0,61
ПММ-14М	1,0	1,00	0,46	0,15	0,25	1,60	2,60	3,40	1,10	—	1,30	—
ПМИ-27	1,0	1,00	0,49	0,29	0,41	1,60	2,00	3,00	1,10	—	1,60	—
МИ-12-8	1,0	1,00	0,45	0,24	0,34	1,60	2,20	3,10	1,01	—	1,60	—

Приложение 11

**Основные характеристики отечественных промышленных
течекскалей**

Тип течекскаля	Модель	Характер работы	Пробное вещество	Минимально обнару- живаемый поток пробного вещества	
				м³·Па/с	г/год
Масс-спектро- метрические передвижные Масс-спектро- метрический стационарный	ПТИ-7А	Вакуумный	Гелий	6,5·10 ⁻¹¹	—
	ПТИ-10	Вакуумный	Гелий	5·10 ⁻¹²	—
	СТИ-11	Вакуумный	Гелий	5·10 ⁻¹⁴	—
Галогенные	ГТИ-6	Вакуумно- атмосферный	Хладон	—	0,2
Искровой	БГТИ-5	Атмосферный	Хладон	—	1,5
	ИО60.010	Вакуумный	—	—	—

**Технические характеристики
механических вакуумных насосов с масляным уплотнением**

Наименование	Насосы				
	2НВР-5ДМ	2НВР-10Д	2НВР-16Д	2НВР-25Д	2НВР-40Д
Быстрота действия в интервале давлений $10^3 - 10^2$ Па, л/с	5	10	16	25	40
Предельное остаточное давление, Па	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
Мощность, кВт	0,9	—	—	—	—
Габариты, мм	$540 \times 160 \times 270$	—	—	—	—
Масса, кг	27	80	100	250	400

Приложение 13

**Технические характеристики
вакуумных агрегатов на базе двухроторных насосов**

Наименование	Агрегаты	
	АВР-50	АВР-150
Быстрота действия в интервале давлений $10^2 - 5$ Па, л/с	40	75
Предельное остаточное давление, Па	10^{-1}	$5 \cdot 10^{-1}$
Мощность, кВт	1,7	3,5
Габариты, мм	$658 \times 448 \times 115$	$896 \times 448 \times 295$
Масса, кг	115	295

Приложение 14

**Технические характеристики бустерных
паромасляных насосов**

Наименование	Насосы			
	НВБМ-0,5	НВБМ-2,5	НВБМ-5	НВБМ-15
Быстрота действия при давлении на входе 1 Па, л/с	700	2500	5000	15 900
Предельное остаточное давление при температуре окружающей среды от 278 до 298 К, Па	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
Мощность, кВт	2,4	6,0	12,0	36
Габариты, мм	$490 \times 410 \times 985$	$695 \times 570 \times 1690$	$1150 \times 910 \times 2348$	$2000 \times 1500 \times 2800$
Масса, кг	70	235	390	1800

Технические характеристики высоковакуумных паромасляных диффузионных насосов

Наименование	Насосы		
	Н-100/350	Н-250/2500	Н-400/7000
Быстрота действия в интервале давлений 10^{-2} — 5×10^{-2} Па, л/с	260	1800	4900
Предельное остаточное давление при температуре окружающей среды 293 К, Па	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Мощность, кВт	0,5	2,0	5,0
Габариты, мм	275 $\times$ 170 $\times$ 310	705 $\times$ 330 $\times$ 588	859 $\times$ 526 $\times$ 762
Масса, кг	7	36	90

Продолжение прилож. 15

Наименование	Насосы		
	Н-630/18 000	Н-1000/45 000	Н-1600/100 000
Быстрота действия в интервале давлений 10^{-2} — 5×10^{-2} Па, л/с	12 000	30 000	79 000
Предельное остаточное давление при температуре окружающей среды 298 К, Па	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Мощность, кВт	9,0	25,0	34,0
Габариты, мм	1304 $\times$ 930 $\times$ 1195	2400	3800
Масса, кг	260	700	1600

Приложение 16

Технические характеристики турбомолекулярных насосов

Наименование	Насосы			
	ВМН-150	ТМН-500	01АБ-450-001	01АБ-1500-002
Быстрота действия по воздуху в диапазоне впускных давлений $4 \cdot 10^{-3}$ — $4 \cdot 10^{-6}$ Па, л/с	160	500	400	1000
Предельное остаточное давление, Па	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Частота вращения ротора, об/мин	30 000	18 000	24 000	21 000
Габариты, мм	230 $\times$ 230 $\times$ 330	606 $\times$ 880 $\times$ 510	260 $\times$ 250 $\times$ 450	350 $\times$ 350 $\times$ 460
Масса, кг	23	215	30	50
Входной фланец ДУ, мм	125	160	160	260

Технические характеристики неохлаждаемых магниторазрядных насосов

Наименование	Насосы					
	НМД-0,0063	НМД-0,025	НМД-0,063	НМД-0,1	НМД-0,16-1	НМД-0,25
Быстродействие по воз- духу в диапазоне давлени- й $5 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-6}$ Па, л/с	6	22	60	110	160	120
Предельное остаточное давление, Па	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$<10^{-7}$
Наибольшее давление за- пуска, Па	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Наибольшее рабочее дав- ление, Па	0,13	0,13	0,13	0,13	0,07	0,13
Габариты, мм:						
высота	160	220	320	320	367	340
в плане	80×85	157×84	320×106	320×180	170×390	320×327
Входной фланец ДУ, мм	25	100	100	100	100	160
Масса, кг	2,9	8,4	21	32	42	53

Продолжение прилож. 17

Наименование	Насосы				
	НМД-0,25-2	НМД-0,25-3	НМД-0,4-1	НМД-0,63	НМД-1
Быстродействие по воз- духу в диапазоне давлени- й $5 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-6}$ Па, л/с	220	260	400	650	1200
Предельное остаточное давление, Па	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
Наибольшее давление за- пуска, Па	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Наибольшее рабочее дав- ление, Па	0,13	0,13	0,07	0,13	0,13
Габариты, мм:					
высота	340	320	367	580	580
в плане	320×327	460×390	460×390	500×356	500×554
Входной фланец ДУ, мм	160	160	160	250	250
Масса, кг	53	60	95	190	290

Технические характеристики охлаждаемых магниторазрядных насосов

Наименование	Насосы				
	НМДО-0,01-1	НМДО-0,025-1	НМДО-0,1-1	НМДО-0,25-1	НМДО-0,63-1
Быстрота действия по воздуху при давлении $5 \cdot 10^{-6}$ Па, л/с	10	25	100	250	600
Предельное остаточное давление, Па	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
Наибольшее давление запуска, Па	5	5	5	5	5
Расход охлаждающей воды, л/ч	50	50—100	100—150	150—200	350
Габариты насоса, мм:					
в плане	100×120	196×200	254×424	254×424	564×450
высота	220	319	550	550	675
Масса насоса (без источника питания), кг	7,5	13,5	46	120	312

Технические характеристики ионно-геттерных насосов

Наименование	Насосы	
	ГИН-0,5М1	ГИН-5
Быстрота действия по воздуху в диапазоне 10^{-4} — 10^{-6} Па, л/с	450	4500
Предельное остаточное давление, Па	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
Наибольшее давление запуска, Па	10^{-1}	10^{-1}
Расход охлаждающей воды, л/ч	300	600
Потребляемая мощность, кВт	0,85	3,5
Габариты, мм:		
в плане	364×280	770×680
высота	464	1100
Масса насоса (без источника питания), кг	36	216

Основные технические характеристики вакуумметров
косвенного действия

Наименование	Тип	Диапазон, Па	
		измерения	блокировки
Реле вакуумное тепловое	PBT-2M	$1,02 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^{-1}$	39С—1,3
Вакуумметр теплоэлектрический блокировочный	ВТБ-2	$4 \cdot 10^4 - 0,26$	$4 \cdot 10^4 - 0,26$
Вакуумметр цифровой	ВЦ-Н-11	$10^2 - 10^{-8}$	$10^2 - 10^{-8}$
Вакуумметр магниторазрядный блокировочный	ВМБ-11	$10^{-1} - 10^{-8}$	$10^{-1} - 10^{-8}$
Вакуумметр магниторазрядный цифровой	ВМЦ-2	$10^{-1} - 10^{-8}$	$10^{-1} - 10^{-8}$
Вакуумметр магниторазрядный цифровой блокировочный	ВМЦБ-12	$1 - 10^{-7}$	$1 - 10^{-7}$
Вакуумметр магниторазрядный блокировочный	ВМБ-8	$1 - 10^{-7}$	$1 - 10^{-7}$
Вакуумметр ионизационный образцовый	ВИО-1	$1 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-9}$	—
Вакуумметр ионизационный	ВИТ-3	$10^2 - 10^{-8}$	—
То же	ВИ-14	$33 - 10^{-8}$	—

Продолжение прилож. 20

Наименование	Манометрический преобразователь	Габариты, мм	Масса, кг
Реле вакуумное тепловое	ПМТ-6-3	$80 \times 158 \times 206$	2,5
Вакуумметр теплоэлектрический блокировочный	ПМТ-6-3	$200 \times 158 \times 319$	6
Вакуумметр цифровой	ПМИ-10-2	$158 \times 100 \times 230$	3
Вакуумметр магниторазрядный блокировочный	ПММ-46	$158 \times 120 \times 395$	10
Вакуумметр магниторазрядный цифровой	ПММ-32-1	$335 \times 246 \times 171$	8
Вакуумметр магниторазрядный цифровой блокировочный	ПММ-32-1	$158 \times 100 \times 230$	3
Вакуумметр магниторазрядный блокировочный	ПММ-32-1	$240 \times 290 \times 240$	7,5
Вакуумметр ионизационный образцовый	ПМИ-39-2	—	26,2
Вакуумметр ионизационный	ПМИ-2, ПМТ-2, ПМТ-4М, ПМИ-10-2	$430 \times 320 \times 300$	30
То же	ПМИ-27 ПМИ-12	$480 \times 220 \times 360$	20

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балицкий А. В. Технология изготовления вакуумной аппаратуры. — М.: Энергия, 1974. — 385 с.
2. Беррер Р. Диффузия в твердых телах. — М.: Изд-во иностр. лит., 1948. — 504 с.
3. Бранауэр С. Адсорбция газов и паров. — М.: Изд-во иностр. лит., 1948. — 784 с.
4. Васильев Г. А. Магниторазрядные насосы. — М.: Энергия, 1970. — 112 с.
5. Волчеквич А. И. Высоковакуумные адсорбционные насосы. — М.: Машиностроение, 1973. — 158 с.
6. Востров Г. А., Розанов Л. Н. Вакуумметры. — Л.: Машиностроение, 1967. — 236 с.
7. Глазков А. А., Малышев И. Ф., Саксаганский Г. Л. Вакуумные системы электрофизических установок. — М.: Атомиздат, 1975. — 192 с.
8. Глазков А. А., Милованова Р. А. Учебная лаборатория вакуумной техники. — М.: Атомиздат, 1971. — 273 с.
9. Гейнце В. Введение в вакуумную технику. — М.: Госэнергоиздат, 1960. — 517 с.
10. Грошковский Я. Техника вакуума. — М.: Изд-во иностр. лит., 1975. — 622 с.
11. Гуляев М. А., Ерюхин А. В. Измерение вакуума. — М.: Стандартиздат, 1967. — 147 с.
12. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. Основы конструирования вакуумных систем. — М.: Энергия, 1971. — 392 с.
13. Джейрам Р. Масс-спектрометрия. Теория и приложения. — М.: Мир, 1964. — 715 с.
14. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. — М.: Мир, 1964. — 715 с.
15. Коль В. Технология материалов для электровакуумных приборов. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1957. — 448 с.
16. Королев Б. И., Кузнецов В. И., Пилко А. И., Плисковский В. Я. Основы вакуумной техники. — М.: Энергия, 1975. — 416 с.
17. Кузнецов В. И. Механические вакуумные насосы. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1959. — 279 с.
18. Ланис В. А., Левина Л. Е. Техника вакуумных испытаний. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 263 с.
19. Медников М. И. Вводы движения в вакуум. — М.: Машиностроение, 1974. — 184 с.
20. Павленко В. А. Газоанализаторы. — М.—Л.: Машиностроение, 1965. — 296 с.
21. Пауэр Б. Д. Высоковакуумные откачные устройства. — М.: Энергия, 1969. — 528 с.

22. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Оборудование для откачки вакуумных приборов. — М.: Энергия, 1965. — 464 с.
23. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. — М.: Энергия, 1979. — 504 с.
24. Попов В. Ф. Нераспыляемые газопоглотители. — Л.: Энергия, 1975. — 104 с.
25. Рафальсон А. Э., Шеришевский А. М. Масс-спектрометрические приборы. — М.: Атомиздат, 1968. — 403 с.
26. Розанов Л. Н. Вакуумные машины и установки. — М.: Машиностроение, 1975. — 336 с.
27. Рот А. Вакуумные уплотнения. — М.: Энергия, 1971. — 464 с.
28. Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппарате-строении/ Г. Л. Саксаганский, Ю. Н. Котельников, М. Д. Малев и др. — М.: Атомиздат, 1976. — 374 с.
29. Трепнел Б. Хемосорбция. — М.: Изд-во иностр. лит., 1958 — 327 с.
30. Тягунов Г. А. Основы расчета вакуумных систем. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1948. — 148 с.
31. Черепнин Н. В. Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. — М.: Советское радио, 1966. — 350 с.
32. Черепнин Н. В. Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике. — М.: Советское радио, 1967. — 408 с.
33. Черепнин Н. В. Сорбционные явления в вакуумной технике. — М.: Советское радио, 1973. — 384 с.
34. Цейтлин А. Б. Пароструйные вакуумные насосы. — М.: Энергия, 1969. — 400 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абсорбент 54
Абсорбция 54
Авогадро закон 15
— число 16
Авторегулировка 150
Агрегат вакуумный 128
Адиабатический процесс 43
Адсорбент 54
Адсорбция 54
— капиллярная 164, 169
— физическая 54, 55
— химическая 54, 61
Азотит 140
Аккомодация, коэффициент 37
Аргонная нестабильность 149
— обработка 153

Б

Баллон форвакуумный 392
Безмасляный вакуум 147
Бойля—Мариотта закон 14
Больцмана постоянная 17
Быстрота действия насоса 36, 86
— откачки объема 39
— — эффективная 47

В

Вакуум, понятие 4
— степени 46
Вакуумметр деформационный 189
— жидкостный 182
— компрессионный 184
— магнитный электроразрядный 201
— тепловой 190
— электронный ионизационный 195
Вакуумные откачные автоматы 278
— — посты 266, 270
Ввод вакуумный для передачи движения 300
Вещество пробное 249
Внутреннее трение, коэффициент 27, 28
Внутренняя энергия 35
Вязкостный режим течения газа 44
Вязкость газа 29

Г

Газ балластный 105
— идеальный 11, 14
— реальный 13, 75
Газовая постоянная универсальная 17
Газовыделение удельное 49, 61
— суммарное 48, 49, 50, 65
Газовые законы 14
Газосодержание 62, 65
Гей-Люссака закон 16
Генератор газа 350
Герметичность 245
Геттер 5, 65, 137, 138
Гнездо откачное 320

Д

Давление вакуумного насоса наибольшее выпускное 84, 390
— — — рабочее 85
— газа барометрическое 182, 183
— — единицы 13, 14
— запуска вакуумного насоса наибольшее 84
— насыщенных паров 77, 78, 104
— парциальное 16
— полное остаточное 86
— предельное остаточное 47, 85
Дальтона закон 16
Десорбция 54, 61
Диссоциация 81
Диффузия 12, 27, 30, 53, 66
— поверхностная 60
Длина расчетная 374
— свободного пути молекул 22
Длительность откачки, расчет 46, 50

Е

Единицы давления газа 14
— потока газа 40

З

Затвор вакуумный 334
Защитная способность ловушки 162
Золотник 350

И

Измерение быстроты действия насоса 160
— давления 177
— потока 230
Изотерма адсорбции 58
Изотермический процесс 43
Испарение 76

К

Квазистационарное течение газа 46
Клаузинга формула 372
Кнудсена уравнение 372
Концентрация молекулярная 14, 15, 177
Криогенератор 155
Критическая температура 75

Л

Ленгмюра коэффициент 37
Ловушки адсорбционные 172
— механические 166
— низкотемпературные охлаждаемые 168
— электрические 175
Лошмидта число 16

М

Масло для вакуумных насосов 360
— кремнийорганическое 364
— минеральное 360, 361
Маслоотражатель 166
Масс-спектрограмма 217

Масс-спектрометр времяпролетный
(хронотрон) 222
— квадрупольный 227
— монополярный 228
— омегатронный 224
— статический 220
Молекулярно-вязкостный режим те-
чения газа 46
Молекулярный режим течения газа
45

Н

Насос адсорбционный 84, 135
— бустерный 120, 391
— вакуумный всодольцевой 93
— — газобалластный 105
— — двухроторный 112
— — с масляным уплотнением 94
— диффузионный 121
— ионно-геттерный 142
— испарительный геттерный 137
— конденсационный 84, 154
— криосорбционный 84, 157
— магнитный электрооразрядный 148
— сорбционный 84
— струйный 119
— турбомолекулярный 129
— — эжекторный 83, 116
— электродуговой геттерный 140
Насыщенный пар 76, 78
Натекание 245

О

Обдувание 254
Обезгаживание 54
Опрессовка 249
Основное уравнение вакуумной тех-
ники 42
Откачка 38
Оценка давления по свечению 248,
251

П

Пар 75
Параметры состояния 42
Плотность газа 14, 177
Политропа, показатель 44
Политропный процесс 43
Поток газа, расчет 40
Проводимость элемента вакуумной
системы 41, 365
Производительность насоса 40, 87
Проницаемость 66
Пуазейля уравнение 369

Разрешающая способность 216
Растворимость 62
Режимы течения газа 44
Резины физико-механические свой-
ства 357
Рейнольдса число 44, 45

С

Сжатия степень 114, 131
Скорость, вероятная 20
— звука 369
— средняя арифметическая 20
— — квадратичная 20
— теплового движения 17, 19
Спллс зонтичное обращенное 121
— — эжекторное 116
Сопротивление трубопровода 40, 41
Сорбция газа 53
Средняя длина свободного пути 22
Стационарное течение газа 46

Т

Теплопроводность 29, 34
Течь 245
Теченскание, метод люминесцент-
ный 250
— — манометрический 252
— — накопления 260
— — опрессовки 249
Торричеллиева пустота 4, 183
Турбулентный режим течения 44

У

Уравнение, состояния идеального
газа 16
— — реального газа 18

Ф

Фика законы 31, 33, 66, 71
Форвакуум 84
Фракционирование 121
Фурье закон 35

Ч

Чувствительность манометрического
преобразователя 197
— масс-спектрометра 216, 219
— относительная 210, 217
— теченскателя 249

Ш

Шарля закон 16
Штенгель откачной 320

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию	3
Введение	4
История развития вакуумной техники	4
Области применения вакуумной техники	8
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ	
ФИЗИКА РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ	
Глава первая. Элементы кинетической теории и газовые законы	11
1.1. Понятие об идеальном газе	11
1.2. Тепловое движение молекул и атомов	11
1.3. Давление и плотность газа	13
1.4. Законы идеальных газов	14
1.5. Уравнение состояния идеальных газов	16
1.6. Уравнение состояния реальных газов	18
1.7. Закон распределения молекул газа по скоростям	19
1.8. Средняя длина свободного пути	22
1.9. Объем газа, занимаемый молекулами, ударяющимися о поверхность стенки в единицу времени	25
1.10. Явления переноса	26
1.11. Внутреннее трение в газах	28
1.12. Диффузия газов	30
1.13. Теплопроводность газов	34
Глава вторая. Теоретические основы процесса откачки	38
2.1. Основные определения вакуумной техники	38
2.2. Сопротивление и проводимость сложного вакуумного трубопровода	41
2.3. Основное уравнение вакуумной техники	42
2.4. Процессы изменения состояния газа в вакуумных системах	42
2.5. Критерии определения границ режимов течения газа в трубопроводах	44
2.6. Расчет длительности откачки при квазистационарном течении газа и постоянных газовыделении и натекании	46
2.7. Расчет длительности откачки при переменном газовом потоке	50
Глава третья. Взаимодействие газов с твердыми телами	53
3.1. О поглощении и выделении газов твердыми телами	53
3.2. Адсорбция и десорбция газов	55
Физическая адсорбция	55
Химическая адсорбция	61
Десорбция	61

Глава четвертая. Растворимость, газосодержание, диффузия, проницаемость	62
4.1. Растворимость и газосодержание в твердых телах	62
4.2. Диффузия газов в твердых телах и проницаемость материалов	66
4.3. Нестационарный процесс диффузии	71
Глава пятая. Давление паров и диссоциация окислов металлов	75
5.1. Понятия «газ» и «пар»	75
5.2. Давление паров материалов	78
5.3. Давление насыщенных паров в вакуумной системе, температура отдельных участков которой неодинакова	78
5.4. Термическая диссоциация окислов металлов	81

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА

Глава шестая. Общие сведения о вакуумных насосах	83
6.1. Классификация вакуумных насосов	83
6.2. Основные параметры и характеристики вакуумных насосов	84
6.3. Области действия вакуумных насосов	87
Глава седьмая. Вакуумные насосы	93
7.1. Водокольцевые насосы	93
7.2. Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением	94
Принцип действия	94
Параметры и характеристики	97
Рабочие жидкости для насосов	99
Конструкции насосов	100
Газобалластное устройство и откачка конденсирующихся паров	102
Практические указания по эксплуатации	108
7.3. Механические вакуумные насосы с деформируемой камерой	110
Принцип действия	110
Практические указания по эксплуатации	111
7.4. Двухроторные вакуумные насосы	112
Принцип действия	112
Конструкции и характеристики	114
Практические указания по эксплуатации	115
7.5. Эжекторные насосы	115
Принцип действия	115
Конструкции и характеристики	116
7.6. Струйные насосы	119
Принцип действия	119
Конструкции и характеристики	120
Практические указания по эксплуатации	128
7.7. Турбомолекулярные насосы	129
Принцип действия	129
Конструкции и характеристики	132
Практические указания по эксплуатации	134
	427

7.8. Адсорбционные насосы . . .	135
7.9. Испарительные геттерные насосы	137
Принцип действия . . .	137
Конструкции и характеристики .	138
7.10. Электродуговые геттерные насосы	140
Принцип действия . . .	140
Конструкции и характеристики	140
7.11. Ионно-геттерные насосы	142
Принцип действия . . .	142
Конструкции и характеристики .	142
Практические указания по эксплуатации	147
7.12. Магнитные электроразрядные насосы	148
Принцип действия . . .	148
Конструкции и характеристики . . .	151
Практические указания по эксплуатации	152
7.13. Конденсационные насосы	154
Принцип действия . . .	154
Конструкции и характеристики	154
7.14. Криосорбционные насосы	157
Глава восьмая. Измерение и контроль основных параметров вакуумных насосов	159
8.1. Измерение скорости действия насосов . .	160
8.2. Измерение предельного остаточного давления .	161
8.3. Измерение наибольшего выпускного давления при давлении, соответствующем максимальной производительности	161
Глава девятая. Ловушки	162
9.1. Назначение и основные требования, предъявляемые к ловушкам . . .	162
9.2. Механические ловушки	166
9.3. Низкотемпературные охлаждаемые ловушки	168
9.4. Адсорбционные ловушки	172
9.5. Электрические ловушки	175
ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ	
ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО И ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ ГАЗОВ	
Глава десятая. Приборы для измерения полного давления разреженного газа (вакуумметры)	177
10.1. Классификация вакуумметров . . .	177
10.2. Жидкостные U-образные вакуумметры	182
10.3. Компрессионные вакуумметры . . .	184
Общее описание и принцип работы .	184
Способы градуировки и измерения . . .	186
Особенности компрессионного вакуумметра	188
10.4. Деформационные вакуумметры	189
10.5. Тепловые вакуумметры	190
Вакуумметры сопротивления (режим постоянства температуры)	192
Термопарные вакуумметры (режим постоянства тока накала)	193
Особенности тепловых вакуумметров	194

10.6. Электронные ионизационные вакуумметры	195
Принцип действия	195
Электронные ионизационные преобразователи для измерения давления в диапазоне среднего вакуума	198
Электронные ионизационные манометрические преобразователи для измерения сверхвысокого вакуума	198
10.7. Магнитные электроразрядные вакуумметры	201
Принцип действия	201
Магнитные электроразрядные вакуумметры с повышенным верхним пределом измеряемых давлений	204
Магнитные электроразрядные вакуумметры для измерения сверхнизких давлений	205
Самоочищающиеся магнитные электроразрядные преобразователи	206
Особенности магнитных электроразрядных вакуумметров	208
10.8. Практические указания по эксплуатации приборов для измерения полного давления	209
Присоединение манометрических преобразователей к вакуумной системе	209
Отсчет давлений	210
Очистка и обезгаживание преобразователей	210
Сорбционно-десорбционные эффекты	211
Инерционность отсчета давления	212
Глава одиннадцатая. Приборы для измерения парциальных давлений газов	213
11.1. Классификация газоанализаторов	213
11.2. Спектр масс и его расшифровка	217
11.3. Статические масс-спектрометры с разделением ионов в магнитном поле	220
11.4. Времяпролетный масс-спектрометр (хронотрон)	222
11.5. Омегатронный измеритель парциальных давлений	224
11.6. Квадрупольный и монополярный масс-спектрометры (электрические фильтры масс)	227
Квадрупольный масс-спектрометр	227
Монополярный масс-спектрометр	228
Глава двенадцатая. Методы измерения потока разреженного газа	230
12.1. Классификация методов	230
12.2. Метод накопления	234
12.3. Метод накопления с анализом динамики изменения давления	235
12.4. Метод калиброванного сопротивления и двух манометрических преобразователей	237
12.5. Метод двух калиброванных сопротивлений и одного манометрического преобразователя	238
12.6. Метод, использующий насос с высокой скоростью действия	240
12.7. Метод порционного перепуска (объемный измеритель потока)	240
12.8. Методы дозирования потока газа	242
Глава тринадцатая. Течеискание	245
	429

13.1. Герметичность вакуумных систем	245
13.2. Методы течеискания	247
13.3. Метод опрессовки	249
13.4. Люминесцентный метод	250
13.5. Искровой течеискатель	251
13.6. Манометрический метод	252
13.7. Галогенный течеискатель	253
13.8. Масс-спектрометрический течеискатель	256

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

Глава четырнадцатая. Принципы построения вакуумных систем	262
14.1. Общие сведения	262
Оборудование для откачки ЭВП	262
Оборудование для нанесения тонких пленок	263
14.2. Основные требования, предъявляемые к вакуумным системам	264
14.3. Непрогреваемые вакуумные системы откачных постов	266
14.4. Прогреваемые высоковакуумные системы откачных постов	270
14.5. Вакуумные системы карусельных и конвейерных машин для откачки ЭВП	278
14.6. Вакуумные системы оборудования для нанесения тонких пленок	285
14.7. Централизованная форвакуумная система	290
Глава пятнадцатая. Элементы вакуумных систем	293
15.1. Разборные вакуумные соединения	293
15.2. Устройства для передачи движения в откачиваемый сосуд	300
15.3. Электрические вакуумные вводы	315
15.4. Смотровые системы	317
15.5. Откачные гнезда	320
Глава шестнадцатая. Коммутационная аппаратура	325
16.1. Основные требования, предъявляемые к коммутационной аппаратуре	325
16.2. Коммутационная аппаратура для непрогреваемых вакуумных систем	326
16.3. Коммутационная аппаратура для прогреваемых вакуумных систем	330
16.4. Устройства для напуска газа в вакуумные системы (натекатели)	346
16.5. Золотники	350
Глава семнадцатая. Конструкционные материалы	352
17.1. Основные требования, предъявляемые к конструкционным материалам	352
17.2. Металлы и их сплавы	352
17.3. Неметаллические материалы	355
17.4. Рабочие жидкости для вакуумных насосов	360

Глава восемнадцатая. Проводимости вакуумных трубопроводов	365
18.1. Истечение газа через отверстия	365
Турбулентный и вязкостный режимы течения газа	365
Молекулярный режим течения газа	366
Молекулярно-вязкостный режим течения газа	367
18.2. Течение газа по трубопроводам	368
Турбулентный режим течения газа	368
Вязкостный режим течения газа	369
Молекулярный режим течения газа	371
Молекулярно-вязкостный режим течения газа	372
18.3. Местные сопротивления	374
Турбулентный режим течения газа	374
Вязкостный режим течения газа	374
Молекулярный режим течения газа	375
Молекулярно-вязкостный режим течения газа	375
Глава девятнадцатая. Выбор средств откачки	378
19.1. Определение необходимой быстроты действия ваку- умного насоса	378
19.2. Согласование насосов, работающих последовательно	379
19.3. Согласование насосов, работающих параллельно	381
19.4. Расчет форвакуумного баллона	382
Глава двадцатая. Методика расчета вакуумных систем	386
20.1. Постановка задачи	386
20.2. Примеры расчетов газовых потоков, длительности откачки и отдельных элементов вакуумных систем	388
20.3. Расчет вакуумной системы электрической печи отжи- га деталей ЭВП	402
Проектный расчет	402
Поверочный расчет	404
Приложения	409
Список литературы	422
Предметный указатель	424

АНАТОЛИЙ ИСААКОВИЧ ПИПКО
ВЛАДИМИР ЯКОВЛЕВИЧ ПЛИСКОВСКИЙ
БОРИС ИВАНОВИЧ КОРОЛЕВ
ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ КУЗНЕЦОВ

Основы вакуумной техники

Редактор *С. И. Гоникберг*

Редактор издательства *Н. Н. Кузнецова*

Технический редактор *Н. Н. Хотулева*

Корректор *М. Г. Гулина*

ИБ № 1798 («Энергия»)

Сдано в набор 25.02.81

Подписано в печать 25.04.81

Т-0574

Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 3 Гарн. шрифта литературная

Печать высокая

Усл. печ. л. 22,68

Уч.-изд. л. 25

Тираж 23 000 экз.

Заказ 1081

Цена 1

Энергоиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10