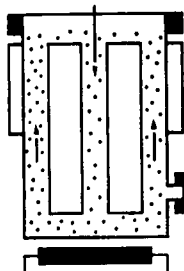


Л. Н. РОЗАНОВ

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

Издание второе,
переработанное и дополненное

Допущено Государственным комитетом СССР
по народному образованию в качестве учебника
для студентов вузов, обучающихся по специальности
«Электронное машиностроение»



Москва «Высшая школа» 1990

ББК 31.77
Р64
УДК 621.52

Рецензент — кафедра полупроводникового и электровакуумно-го машиностроения Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (зав. кафедрой — д-р техн. наук, проф. Л. И. Волчкович)

Розанов Л. Н.
Р64 Вакуумная техника: Учеб. для вузов по спец. «Вакуумная техника». — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк. 1990. — 320 с.: ил.

ISBN 5-06-000479-1

В книге рассматриваются физико-химические процессы в вакууме и на поверхности твердого тела, течение газов по трубопроводу; вопросы объемной и сорбционной откачки, принцип действия вакуумных насосов, течеискание; даны типовые вакуумные схемы машин и установок, основы конструирования вакуумных систем. Во втором издании (1-е — 1982 г.) в новом методическом изложении даны разделы физики вакуума, физических процессов и сорбционных явлений в вакууме.

Р 2210020000(4309000000)—133 172—89
001(01)—90

ББК 31.77
6П5.7

Учебное издание

Розанов Леонид Николаевич

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

Зав. редакцией *В. И. Трефилов*. Редактор *Е. А. Орехова*.
Худож. редактор *Г. М. Скворцова*. Переплет художника *В. В. Гарбузова*.
Мл. редактор *С. А. Пацева*. Технический редактор *Г. А. Фетисова*.
Корректор *Г. И. Кострикова*

ИБ № 7389

Изд. № ЭР—499. Слано в набор 28.06.89. Подп. в печать 02.01.90. Т—06001.
Формат 60×88^{1/8}. Бум. офс. № 1. Гарнитура литературная. Печать офсетная.
Объем 18,60 усл. печ. л. 19,60 усл. кр.-отт. 19,98 уч.-изд. л.
Тираж 15 000 экз. Зак. № 1634. Цена 1 руб.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.
Московская типография № 8 Государственного комитета СССР по печати,
101898, Москва, Хохловский пер., 7.

ISBN 5-06-000479-1

© Л. Н. Розанов, 1990

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка новых технологических процессов, обеспечивающих техническое перевооружение основных отраслей производства, тесно связана с вакуумной техникой.

Новые типы полупроводниковых структур, особо чистые материалы, сплавы, специальные покрытия изготавливаются в вакууме. Вакуум является идеально чистой технологической средой, в которой можно осуществить электрохимические и электрофизические процессы при изготовлении изделий микроэлектроники.

Настоящий учебник охватывает все основные разделы вакуумной техники. Во втором издании учебника существенно переработаны главы по физике вакуума, сорбционным явлениям и физическим процессам в вакууме. Особое внимание уделено улучшению описания закономерностей процессов, происходящих при различных степенях вакуума. Выделение специальной главы, посвященной физико-химическим методам получения вакуума, соответствует все расширяющейся практике их применения. Расчет нестационарных процессов в вакуумных системах, выделенный в данном издании в отдельную главу, рассмотрен более подробно. Значительная часть объема учебника посвящена изучению методов проектирования вакуумных систем. Оптимизация при проектировании по экономическому критерию делает их удобными для автоматизированного проектирования на ЭВМ.

Каждая глава учебника заканчивается контрольными вопросами, которые могут быть использованы для контрольных мероприятий при аудиторном изучении курса или для самопроверки. В учебнике имеются подробные примеры решения типовых задач.

Курс «Вакуумная техника» изучается студентами в рамках специальной технологической и конструкторской подготовки. Разделы физики вакуума, сорбционных явлений, физических процессов в вакууме, получения и измерения вакуума можно отнести к технологической, а расчет и проектирование вакуумных систем при стационарном и нестационарном режимах работы, а также конструирование вакуумных систем — к конструкторской подготовке. Учебник написан на основе курса лекций, которые читают-

ся автором в Ленинградском политехническом институте им. М. И. Калинина.

Автор выражает благодарность д-ру техн. наук, профессору Л. И. Волчковичу и канд. техн. наук, доц. Е. А. Деулину за ценные замечания, высказанные в процессе рецензирования рукописи, а также сотрудникам кафедры «Автоматы» ЛПИ им. М. И. Калинина М. М. Донской и М. Г. Гореловой за помощь в работе над рукописью. Пожелания и замечания по книге можно направлять по адресу: 101430, Москва ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Автор

ВВЕДЕНИЕ

§ В.1. История развития вакуумной техники

До середины XVII в. понятие «вакуум», в переводе с латинского означающее пустоту, использовалось лишь в философии. Древнегреческий философ Демокрит одним из «начал мира» выбрал пустоту. Позднее Аристотель вводит понятие эфира — неощутимой среды, способной передавать давление. В этот период знания о свойствах разреженного газа еще отсутствовали, но вакуум уже широко использовался в водоподъемных и пневматических устройствах.

Научный этап развития вакуумной техники начинается с 1643 г., когда в Италии Э. Торричелли, ученик знаменитого Г. Галилея, измерил атмосферное давление. В 1672 г. в Германии О. Герике изобрел механический поршневой насос с водяным уплотнением, что дало возможность проведения многочисленных исследований свойств разреженного газа. Изучается влияние вакуума на живые организмы. Опыты с электрическим разрядом в вакууме привели вначале к открытию электрона, а затем и рентгеновского излучения. Теплоизолирующие свойства вакуума помогли создать правильное представление о способах передачи теплоты и послужили толчком для развития криогенной техники.

Успешное изучение свойств разреженного газа обеспечило возможность его широкого технологического применения. Оно началось с изобретения в 1873 г. первого электровакуумного прибора — лампы накаливания с угольным электродом — русским ученым А. Н. Лодыгиным и открытием американским ученым и изобретателем Т. Эдисоном в 1883 г. термоэлектронной эмиссии. С этого момента вакуумная техника становится технологической основой электровакуумной промышленности.

Расширение практического применения вакуумной техники сопровождалось быстрым развитием методов получения и измерения вакуума. За небольшой период времени в начале XX в. были изобретены широко применяемые в настоящее время вакуумные насосы: вращательный (Геде, 1905), криосорбционный (Д. Дьюар, 1906), молекулярный (Геде, 1912), диффузионный (Геде, 1913). Аналогичные успехи были достигнуты и в развитии способов из-

мерения вакуума. К U-образному манометру Торричелли добавились компрессионный (Г. Мак-Леод, 1874), тепловой (М. Пирани, 1909), ионизационный (О. Бакли, 1916).

Одновременно совершенствуются научные основы вакуумной техники. В России П. Н. Лебедев (1901) впервые использует в своих опытах идею удаления остаточных газов с помощью ртутного пара. В этот же период исследуются фундаментальные свойства газов при низких давлениях, течение газов и явления переноса (М. Кнудсен, М. Смолуховский, И. Ленгмюр, С. Дешман).

В СССР становление вакуумной техники связано с именем академика С. А. Векшинского (1896—1974), организовавшего в 1928 г. вакуумную лабораторию в Ленинграде, а затем возглавившего научно-исследовательский вакуумный институт в Москве.

До 50-х годов существовало мнение, что давления ниже 10^{-6} Па получить невозможно. Однако работы американских ученых Ноттингема (1948) по измерению фоновых токов ионизационного манометра и Альперта (1952) по созданию ионизационного манометра с осевым коллектором расширили диапазон рабочих давлений вакуумной техники еще на три-четыре порядка в область сверхвысокого вакуума.

Для получения сверхвысокого вакуума изобретают новые насосы: турбомолекулярный (Беккер, 1958), магниторазрядный (Джеспен и Холанд, 1959); совершенствуются паромасляные и криосорбционные насосы.

При измерении низких давлений применяются анализаторы парциальных давлений, с помощью которых определяют состав и давление каждой компоненты остаточных газов. Сверхвысоковакуумные системы потребовали для обеспечения их надежной сборки и эксплуатации разработки чувствительных методов определения натеканий в вакуумных системах: масс-спектрометрического, галоидного и др. Для снижения газовой нагрузки вакуумных конструкционных материалов начинает применяться высокотемпературный прогрев всей вакуумной установки. Вакуумные системы изготавливают цельнометаллическими, разрабатывают конструкции сверхвысоковакуумных уплотнений, вводов движения и электрических вводов в вакуум. Совершенствуются технологические методы получения неразъемных соединений металла со стеклом, электронно-лучевая и газовая сварка. В 60-х годах успешное развитие вакуумной техники привело к разработке стохастических методов расчета вакуумных систем.

Достижения криогенной техники в получении низких температур нашли применение в технологии получения вакуума. Криогенные вакуумные насосы начали применять в научных исследованиях, а затем и в промышленности. Разработка откачных средств, не загрязняющих откачиваемый объект, открыла новые перспективы для применения вакуумной техники.

§ В.2. Применение вакуума в науке и технике

Экспериментальные исследования испарения и конденсации, поверхностных явлений, некоторых тепловых процессов, низких температур, ядерных и термоядерных реакций осуществляются в вакуумных установках. Основной инструмент современной ядерной физики — ускоритель заряженных частиц — немыслим без вакуума. Вакуумные системы применяются в химии для изучения свойств чистых веществ, изучения состава и разделения компонентов смесей, скоростей химических реакций.

Техническое применение вакуума непрерывно расширяется, но с конца прошлого века и до сих пор наиболее важным его применением остается электронная техника. В электровакуумных приборах вакуум является конструктивным элементом и обязательным условием их функционирования в течение всего срока службы. Низкий и средний вакуум используется в осветительных приборах и газоразрядных устройствах. Высокий вакуум — в приемно-усилительных и генераторах лампах. Наиболее высокие требования к вакууму предъявляются при производстве электронно-лучевых трубок и сверхвысококачественных приборов. Для работы полупроводникового прибора вакуум не требуется, но в процессе его изготовления широко используется вакуумная технология. Особенно широко вакуумная техника применяется в производстве микросхем, где процессы нанесения тонких пленок, ионного травления, электронолитографии обеспечивают получение элементов электронных схем субмикронных размеров.

В металлургии плавка и переплав металлов в вакууме освобождает их от растворенных газов, благодаря чему они приобретают высокую механическую прочность, пластичность и вязкость. Плавкой в вакууме получают безуглеродистые сорта железа для электродвигателей, высокоэлектропроводную медь, магний, кальций, тантал, платину, титан, цирконий, бериллий, редкие металлы и их сплавы. В производстве высококачественных сталей широко применяется вакуумирование. Спекание в вакууме порошков тугоплавких металлов, таких, как вольфрам и молибден, является одним из основных технологических процессов порошковой металлургии. Сверхчистые вещества, полупроводники, диэлектрики изготавливаются в вакуумных кристаллизационных установках. Сплавы с любым соотношением компонентов могут быть получены методами вакуумной молекулярной эпитаксии. Искусственные кристаллы алмаза, рубина, сапфира получают в вакуумных установках. Диффузионная сварка в вакууме позволяет получать неразъемные герметичные соединения материалов с сильно различающимися температурами плавления. Таким способом соединяют керамику с металлом, сталь с алюминием и т. д. Высококачественное соединение материалов с однородными свойствами обеспечивает электронно-лучевая сварка в вакууме.

В машиностроении вакуум применяется при исследованиях процессов схватывания материалов и сухого трения, для нанесения упрочняющих покрытий на режущий инструмент и износостойких покрытий на детали машин, захвата и транспортирования деталей в автоматах и автоматических линиях.

Химическая промышленность применяет вакуумные сушильные аппараты при выпуске синтетических волокон, полиамидов, амнопластов, полиэтилена, органических растворителей. Вакуум-фильтры используются при производстве целлюлозы, бумаги, смазочных масел. В производстве красителей и удобрений применяются кристаллизационные вакуумные аппараты.

В электротехнической промышленности вакуумная пропитка как самый экономичный метод широко распространена в производстве трансформаторов, электродвигателей, конденсаторов и кабелей. Повышаются срок службы и надежность при работе в вакууме переключающих электрических аппаратов.

Оптическая промышленность при производстве оптических и бытовых зеркал перешла с химического серебрения на вакуумное алюминирование. Просветленная оптика, защитные слои и интерференционные фильтры получают напылением тонких слоев в вакууме.

В пищевой промышленности для длительного хранения и консервирования пищевых продуктов используют вакуумную сушку вымораживанием. Расфасовка скоропортящихся продуктов, осуществляемая в вакууме, удлиняет сроки хранения фруктов и овощей. Вакуумное выпаривание применяется при производстве сахара, опреснении морской воды, солеварении. В сельском хозяйстве широко распространены вакуумные доильные аппараты. В быту пылесос стал нашим незаменимым помощником.

На транспорте вакуум используется для подачи топлива в карбюраторах, в вакуумных усилителях тормозных систем автомобилей. Имитация космического пространства в условиях земной атмосферы необходима для испытания искусственных спутников и ракет.

В медицине вакуум применяется для сохранения гормонов, лечебных сывороток, витаминов, при получении антибиотиков, анатомических и бактериологических препаратов.

ГЛАВА 1

ФИЗИКА ВАКУУМА

§ 1.1. Понятие о вакууме и давлении

Свойства газов при низких давлениях изучаются в физике вакуума, являющейся разделом молекулярно-кинетической теории газов. *Основой физики вакуума* являются следующие постулаты: 1) газ состоит из отдельных движущихся молекул; 2) существует постоянное распределение молекул газа по скоростям, т. е. одной и той же скоростью обладает всегда одинаковое число молекул; 3) при движении молекул газа нет преимущественных направлений, т. е. пространство газовых молекул изотропно; 4) температура газа — величина, пропорциональная средней кинетической энергии его молекул; 5) при взаимодействии с поверхностью твердого тела молекула газа адсорбируется.

Состояние газа, при котором его давление ниже атмосферного, называется в а к у у м о м. При давлениях, близких к атмосферному, пользуются количественным определением вакуума как разности атмосферного и абсолютного давлений. При абсолютном давлении, отличающемся от атмосферного более чем на два порядка, эта разность остается практически постоянной и не может служить количественной характеристикой разреженного газа. В этих условиях вакуум количественно определяют абсолютным давлением газа. При очень малых давлениях, которые непосредственно уже не могут быть измерены существующими приборами, состояние газа можно характеризовать количеством молекул в единице объема, т. е. молекулярной концентрацией газа.

При взаимодействии молекул газа с поверхностью твердого тела нормальная составляющая изменения количества движения молекулы равна $mv \cos \Theta$; где Θ — угол между нормалью к поверхности и вектором скорости; m и v — масса и скорость молекулы. Рассмотрим случай, когда между поверхностью и газовой средой существует энергетическое и адсорбционное равновесие. Каждой адсорбированной молекуле при этом соответствует одна десорбированная молекула с противоположным направлением вектора скорости. Таким образом, суммарное изменение количества движения адсорбированной и десорбированной молекул $\Delta K = = 2mv \cos \Theta$.

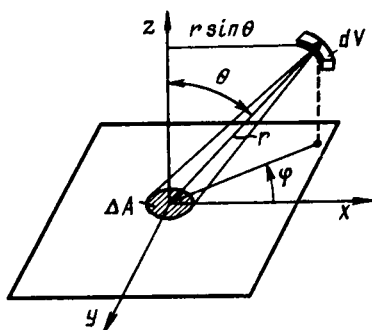


Рис. 1.1. Расчетная схема для определения давления

из центра dV видна площадка ΔA :

$$dN = n \frac{d\omega}{4\pi} dV. \quad (1.2)$$

Телесный угол

$$d\omega = \cos \theta \Delta A / r^2, \quad (1.3)$$

где r — расстояние между поверхностью и выделенным объемом (рис. 1.1).

Для объема dV в полярной системе координат справедливо выражение

$$dV = r \sin \theta d\varphi d\theta dr. \quad (1.4)$$

Давление газа на поверхность твердого тела найдем интегрированием по объему полусферы, из которой молекулы достигают поверхности за время Δt , с радиусом $R = v\Delta t$.

С учетом выражения (1.1)

$$p = \int_V \frac{2mv \cos \theta}{\Delta A \Delta t} dN. \quad (1.5)$$

Подставляя (1.2), (1.3), (1.4) в (1.5), получим

$$p = \frac{nmv}{2\pi\Delta t} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta \int_0^R dr = \frac{nmv^2}{3}. \quad (1.6)$$

Согласно принятым постулатам, существует распределение молекул по скоростям, поэтому в (1.6) вместо постоянной введем

среднеквадратичную скорость молекул $v_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2$. Тогда урав-

Согласно второму закону Ньютона, давление молекулы на поверхность твердого тела

$$p = \frac{\Delta K}{\Delta A \Delta t} = \frac{2mv \cos \theta}{\Delta A \Delta t}, \quad (1.1)$$

где ΔA — площадь поверхности; Δt — время взаимодействия молекулы с поверхностью.

Число молекул в элементарном объеме dV , движущихся в направлении ΔA , с учетом постулата об отсутствии преимущественных направлений пропорционально телесному углу $d\omega$, под которым из

нение для расчета давления газа примет вид

$$p = nmv_{\text{кв}}^2/3. \quad (1.7)$$

Учитывая, что плотность газа $\rho = nm$, выражение (1.7) можно переписать как $p = \rho v_{\text{кв}}^2/3$.

Условия равновесия, использованные при выводе уравнения (1.7), могут не выполняться. Примером является конденсирующая поверхность, с которой из-за очень большого времени адсорбции не происходит десорбции молекул газа. Тело, вылетевшее в космическое пространство из земной атмосферы, десорбирует с поверхности молекулы газа. Количеством же молекул, ударяющихся о поверхность этого тела, можно пренебречь. Для точного расчета давления газа на поверхности твердого тела нужно знать соотношение потоков падающих и вылетающих молекул газа.

§ 1.2. Газовые законы

Если в объеме находится смесь из K химически не взаимодействующих газов, то для определения давления смеси $p_{\text{см}}$ необходимо подсчитать сумму:

$$p_{\text{см}} = \sum_{i=1}^K \frac{1}{3} m_i n_i v_{\text{кв}i}^2. \quad (1.8)$$

Сравнивая (1.7) и (1.8), можно записать

$$p_{\text{см}} = \sum_{i=1}^K p_i. \quad (1.9)$$

Последнее выражение известно под названием закона Дальтона и формулируется следующим образом: *общее давление смеси химически не взаимодействующих газов равно сумме парциальных давлений компонентов смеси.*

Воспользовавшись определением температуры как величины, пропорциональной средней кинетической энергии молекул газа, можно записать $mv_{\text{кв}}^2/2 = cT$, где c — постоянная. Тогда уравнение (1.7) для расчета давления газа можно представить в виде $p = \frac{2}{3} ncT$. Если обозначить $k = 2c/3$, то

$$p = nkT, \quad (1.10)$$

а средняя кинетическая энергия молекул

$$\frac{mv_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (1.11)$$

Уравнение (1.10) известно под названием уравнения газового состояния. Оно связывает между собой три основ-

ных параметра состояния газа: *давление, молекулярную концентрацию и температуру.*

Постоянная k называется постоянной Больцмана, и ее экспериментальное значение равно $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Уравнение (1.10) можно представить также в другой записи:

$$p = \frac{Nm}{VM} RT, \quad (1.12)$$

где M — молекулярная масса газа; V — объем газа; R — универсальная газовая постоянная, $R = kN_A = 8,31 \cdot 10^3$ Дж/(К·моль), N_A — число Авогадро, $N_A = M/m = 6,02 \cdot 10^{26}$ кмоль $^{-1}$.

Следствием (1.10) или (1.12) является то, что при постоянной массе и неизменном давлении объем газа пропорционален его абсолютной температуре (*закон Гей-Люсака*). Если же постоянны масса газа и его объем, то давление газа пропорционально его абсолютной температуре (*закон Шарля*). При постоянных массе и температуре газа произведение его давления на объем остается неизменным (*закон Бойля — Мариотта*). При постоянном давлении и температуре газа молекулярная концентрация не зависит от рода газа (*закон Авогадро*).

§ 1.3. Частота соударений молекул газа с поверхностью и единицы давления

Число молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени, или частота соударений,

$$N_q = \int_V \frac{dN}{\Delta A \Delta t} = \frac{n}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta \int_0^{R-v\Delta t} \frac{dr}{\Delta t} = \frac{nv}{4}, \quad (1.13)$$

где dN определяется согласно (1.2) — (1.4).

С учетом функции распределения молекул по скоростям имеем

$$N_q = nv_{ap}/4, \quad (1.14)$$

где v_{ap} — среднеарифметическая скорость молекул газа.

Объем газа, ударяющийся о единицу поверхности в единицу времени, можно выразить через частоту соударений и молекулярную концентрацию:

$$V_q = N_q/n = v_{ap}/4. \quad (1.15)$$

Полученное выражение не зависит от давления и определяет максимальную быстроту действия идеального вакуумного насоса, откачивающего все молекулы газа, которые попадают в него через входное отверстие.

Единицей давления в СИ является Па (паскаль), численно равный 1 Н/м^2 . Иногда применяют единицу $1 \text{ гПа} = 10^2 \text{ Па}$.

В литературе по вакуумной технике можно встретить также и ряд других единиц давления. Наиболее распространенной внесистемной единицей давления является миллиметр ртутного столба (торр). Давление газа 1 мм рт. ст. равно давлению, которое создает столбик ртути высотой 1 мм при условии, что плотность ртути равна 13595,1 кг/м³ (при 0°C), а земное ускорение соответствует нормальному 9,80665 м/с² на широте 45°. Давление столба жидкости $p = \rho gh$, тогда 1 мм рт. ст. = $13595,1 \cdot 9,80665 \cdot 10^{-3} = 133,32239$ Н/м².

В метеорологии в качестве единицы давления часто используется 1 бар = 10⁵ Па. Отношения между различными единицами давления даны в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Соотношение между единицами давления

Единицы давления	1 Па	1 мм рт. ст.	1 дин/см ²	1 физ. ат.	1 кгс/см ²	1 кал/м ³
1 Па	1	$7,50 \cdot 10^{-3}$	10	$9,87 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-1}$
1 мм рт. ст.	$1,33 \cdot 10^2$	1	$1,33 \cdot 10^3$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$3,18 \cdot 10^2$
1 дин/см ²	$1,00 \cdot 10^{-1}$	$7,50 \cdot 10^{-4}$	1	$9,87 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$2,39 \cdot 10^{-2}$
1 физ. ат.	$1,01 \cdot 10^5$	$7,60 \cdot 10^2$	$1,01 \cdot 10^6$	1	$1,03 \cdot 10^0$	$2,39 \cdot 10^4$
1 кгс/см ²	$9,81 \cdot 10^4$	$7,36 \cdot 10^2$	$9,81 \cdot 10^5$	$9,68 \cdot 10^{-1}$	1	$2,34 \cdot 10^4$
1 кал/м ³	$4,19 \cdot 10^0$	$3,14 \cdot 10^{-2}$	$4,19 \cdot 10^1$	$4,13 \cdot 10^{-5}$	$4,27 \cdot 10^5$	1

Для описания процессов, в которых давление изменяется в очень широких пределах, удобна логарифмическая единица давления. Она может быть, например, задана в виде $pA = -\lg p$, где p — давление в физических атмосферах. Значение $pA = 0$ соответствует 1 физ. ат., $pA = 1$ соответствует 0,1 физ. ат и т. д.

Состояние газа можно также характеризовать его молекулярной концентрацией. Из уравнения газового состояния (1.10) следует, что при 273 К $n = 3,538 \cdot 10^{22} p_{\text{торр}} = 2,65 \cdot 10^{20} p_{\text{Па}} \text{ м}^{-3}$.

§ 1.4. Распределение молекул газа по скоростям

При соударениях друг с другом или со стенками вакуумной камеры молекулы газа изменяют свои скорости как по величине, так и по направлению. Пользуясь гипотезами о существовании стационарного распределения молекул по скоростям и об изотропности пространства газовых молекул, а также учитывая, что, согласно (1.11), среднеквадратичная скорость $v_{\text{кв}} = \sqrt{3kT/m}$, Максвелл получил функцию распределения молекул по скоростям

$$dn_v = 4n\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{(mv)^2}{2kT}} dv, \quad (1.16)$$

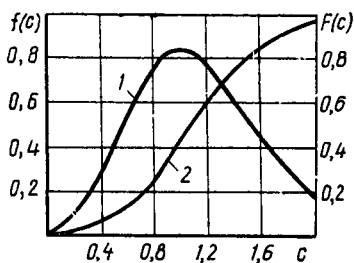


Рис. 1.2. Дифференциальная $f(c)$ и интегральная $F(c)$ функции распределения молекул по скоростям:

1 — $f(c)$, 2 — $F(c)$

где dn_v — число молекул, скорости которых заключены в пределах от v до $v + dv$.

Скорость, при которой наблюдается максимум функции распределения, называется наиболее вероятной скоростью:

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{2kT/m}. \quad (1.17)$$

Если ввести обозначение $c = v/v_{\text{вер}}$, то формулу (1.16) можно переписать так:

$$dn_v = \frac{4n}{\sqrt{\pi}} c^2 e^{-c^2} dc.$$

Безразмерные функции $f(c) = dn_v/(ndc)$ и $F(c) = \int_0^c f(c) dc$

представлены на рис. 1.2. Функция $F(c)$ численно равна доле общего числа молекул, скорости которых не превышают c .

В вакуумных расчетах часто используют скорости: среднеарифметическую

$$v_{\text{ар}} = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} v dn_v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}; \quad (1.18)$$

среднеквадратичную

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{1}{n} \int_0^{\infty} v^2 dn_v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \quad (1.19)$$

Соотношение между скоростями $v_{\text{вер}}$, $v_{\text{ар}}$ и $v_{\text{кв}}$ равно 1:1,128:1,225. Так, указанные скорости для молекул азота при 0°C составляют $v_{\text{вер}} = 402$ м/с, $v_{\text{ар}} = 453$ м/с, $v_{\text{кв}} = 492$ м/с. Среднеарифметические скорости молекул некоторых газов при различных температурах приведены в табл. 1.2.

Согласно (1.14), для воздуха при $T = 300$ К и $M = 29$ кг/кмоль при атмосферном давлении поток газовых молекул $N_q = 2,9 \times 10^{23}$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$, а из (1.15) объем молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени, $V_q = 11,6 \cdot 10^{-3}$ м 3 /(с·см 2).

Преобразуя (1.16), получим функцию распределения молекул по энергиям:

$$dn_E = \frac{2n}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-3/2} e^{-E/(kT)} \sqrt{E} dE.$$

Здесь $E = mv_{\text{кв}}^2/2$ — энергия поступательного движения молекулы; dn_E — число молекул, энергия которых лежит в интервале от E до $E + dE$. Вводя переменную $x = E/(kT)$, получим

$$f(x) = \frac{d(n_E/n)}{dx} = \sqrt{\frac{4x}{\pi}} \times x e^{-x}. \quad (1.20)$$

Интегральная кривая, представляющая собой долю молекул газа, энергия которых меньше E , определяется функцией

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx. \quad (1.21)$$

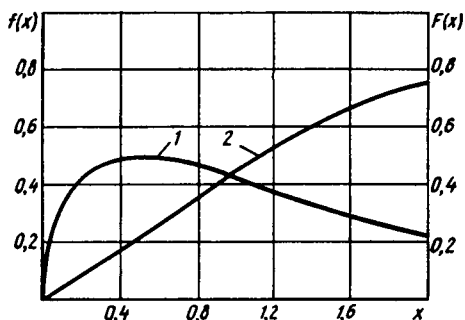


Рис. 1.3. Дифференциальная $f(x)$ и интегральная $F(x)$ функции распределения молекул по энергиям:
1 — $f(x)$, 2 — $F(x)$

Таблица 1.2

Среднеарифметические скорости молекул некоторых газов при различных температурах

Газы	$v_{\text{ар}}, \text{ м/с}$				Газы	$v_{\text{ар}}, \text{ м/с}$			
	4,2 К	77 К	293 К	600 К		4,2 К	77 К	293 К	600 К
N_2	56	245	470	672	Хе	26	110	220	311
Ar	47	200	395	563	H_2O	70	300	590	839
O_2	53	225	440	629	Воздух	54	235	460	661
CO_2	45	195	375	536	Co	56	245	470	672
Ne	67	285	555	792	He	150	640	1250	1785
Kr	33	140	270	325	CH_4	75	320	625	889
H_2	210	906	1770	2524					

На рис. 1.3 в безразмерной форме представлены графики функций (1.20) и (1.21). Максимум дифференциальной кривой соответствует наиболее вероятной энергии $E_{\text{вер}} = 0,5 kT$. Расчет среднеарифметического значения энергии молекул дает $E_{\text{ар}} = 1,5 kT$.

Наиболее важные значения безразмерных функций даны в табл. 1.3.

Рассмотрим вывод функции распределения (1.16), существование которой постулируется молекулярно-кинетической теорией. Число молекул dn_{v_x} , скорости которых заключены в промежутке от v_x до $v_x + dv_x$, пропорционально общему числу молекул n , приращению скорости dv_x и определяется функцией

Значения безразмерных функций законов распределения

c	$f(c)$	$F(c)$	x	$f(x)$	$F(x)$
0.1	0,0223	0,0008	0,05	0,2401	0,0082
0.2	0,0867	0,0059	0.1	0,3229	0,0224
0.3	0,1856	0,0193	0.2	0,4131	0,0598
0.4	0,3077	0,0438	0.3	0,4578	0,1036
0.5	0,4393	0,0812	0.4	0,4785	0,1505
0.6	0,5668	0,1316	0.5	0,4839	0,1987
0.7	0,6775	0,1939	0.6	0,4797	0,2470
0.8	0,7613	0,2663	0.7	0,4688	0,2945
0.9	0,8129	0,3453	0.8	0,4535	0,3406
1.0	0,8302	0,4276	0.9	0,4352	0,3851
1.2	0,7697	0,5896	1.0	0,4152	0,4276
1.4	0,6232	0,7286	1.4	0,3294	0,5765
1.6	0,4464	0,8369	1.8	0,2502	0,6920
1.8	0,2862	0,9096	2.0	0,2160	0,7385
2.0	0,1652	0,9540	3.0	0,0973	0,8884
2.5	0,0272	0,9941	5.0	0,0170	0,9814

распределения $f(v_x)$. Аналогичные соотношения можно записать для осей координат y и z . Таким образом,

$$\begin{aligned}dn_{v_x} &= n f(v_x) dv_x, \\dn_{v_y} &= n f(v_y) dv_y, \\dn_{v_z} &= n f(v_z) dv_z.\end{aligned}\tag{1.22}$$

Число молекул, обладающих скоростями, вектор которых находится внутри параллелепипеда со сторонами dv_x , dv_y , dv_z с учетом независимости координат определяется на основании теории вероятности по формуле

$$dn_v = n f(v_x) f(v_y) f(v_z) dv_x \cdot dv_y \cdot dv_z.\tag{1.23}$$

Так как пространство газовых молекул изотропно, а концентрация частиц, имеющих скорость v , одинакова во всем пространстве скоростей, то

$$\frac{dn_v}{dv_x dv_y dv_z} = \frac{dn_v}{4\pi v^2 dv}.\tag{1.24}$$

Функция распределения не зависит от направления и определяется только модулем скорости v , т. е.

$$f(v_x) f(v_y) f(v_z) = f(v).\tag{1.25}$$

Этому уравнению удовлетворяют функции

$$f(v_x) = A e^{-Bv_x^2}, \quad f(v_y) = A e^{-Bv_y^2}, \quad f(v_z) = A e^{-Bv_z^2},\tag{1.26}$$

что можно проверить подстановкой (1.26) в (1.25):

$$f(v) = A^3 e^{-B(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} = A^3 e^{-Bv^2}.\tag{1.27}$$

Таким образом, (1.22) с учетом (1.26) можно представить в виде

$$\begin{aligned}dn_{v_x} &= An e^{-Bv_x^2} dv_x, \\dn_{v_y} &= An e^{-Bv_y^2} dv_y, \\dn_{v_z} &= An e^{-Bv_z^2} dv_z.\end{aligned}\tag{1.28}$$

Перепишем выражение (1.23), используя (1.24), (1.25), (1.27):

$$dn_v = A^3 4\pi n e^{-Bv^3} v^2 dv.\tag{1.29}$$

Для нахождения постоянных A и B проинтегрируем (1.29) по скоростям. Получим

$$n = \int_{v=0}^{v=\infty} dn_v = 4\pi n A^3 \int_0^{\infty} \exp(-Bv^2) v^2 dv.\tag{1.30}$$

Известно, что

$$\int_0^{\infty} \exp(-\alpha x^2) x^{2k} dx = \frac{\sqrt{\pi} \cdot 1 \cdot 3 \dots (2k-1)}{2^{(k+1)} \alpha^{(k+1/2)}}.\tag{1.31}$$

Вычислив интеграл в (1.30) согласно (1.31), имеем

$$A = \sqrt{B/\pi}.\tag{1.32}$$

Уравнение (1.32) устанавливает связь между искомыми постоянными. Для определения их значений воспользуемся выражением для среднеквадратичной скорости из (1.11)

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{1}{n} \int_0^{\infty} v^2 dn_v}.\tag{1.33}$$

Подставляя (1.29) в (1.33), будем иметь

$$v_{кв} = \sqrt{4\pi A^3 \int_0^{\infty} \exp(-Bv^2) v^4 dv}.\tag{1.34}$$

Значение интеграла в (1.34) найдем согласно (1.31):

$$\int_0^{\infty} \exp(-Bv^2) v^4 dv = 3\sqrt{\pi}/(8B^{5/2}),\tag{1.35}$$

тогда, учитывая (1.32) и (1.34), получим $v_{кв} = \sqrt{3/2B} = \sqrt{3\zeta T/m}$ откуда

$$B = \frac{m}{2kT} \quad \text{и} \quad A = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2}.$$

Воспользуемся значениями коэффициентов A и B и перепишем функцию распределения (1.27) в виде

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right).$$

Тогда число молекул, имеющих скорости в интервале от v до $v+dv$, согласно (1.29), будет

$$d n_v = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} 4\pi n \exp \left(- \frac{mv^2}{2kT} \right) v^2 dv,$$

что совпадает с (1.16).

§ 1.5. Атмосферное давление

Атмосферный воздух — это основная газовая смесь, с которой приходится иметь дело в вакуумной технике (табл. 1.4). Он состоит в основном из азота, кислорода и паров воды. При 25°C и 50% влажности парциальное давление паров воды составляет 12 гПа.

Таблица 1.4

Состав сухого атмосферного воздуха

Газы	Состав, %	Парциальное давление, гПа (общее давление 10 ⁵ гПа)	Газы	Состав, %	Парциальное давление, гПа (общее давление 10 ⁵ гПа)
N ₂	78,1	781	CH ₄	2,0 · 10 ⁻⁴	2,0 · 10 ⁻³
O ₂	21	210	Kr	1,0 · 10 ⁻⁴	1,0 · 10 ⁻³
Ar	0,9	9	N ₂ O	5,0 · 10 ⁻⁵	5,0 · 10 ⁻⁴
CO ₂	0,03	0,3	H ₂	5,0 · 10 ⁻⁵	5,0 · 10 ⁻⁴
Ne	1,8 · 10 ⁻³	1,8 · 10 ⁻²	Xe	9,0 · 10 ⁻⁶	9,0 · 10 ⁻⁵
He	5,2 · 10 ⁻⁴	5,2 · 10 ⁻³			

В качестве нормальных условий приняты давление 10⁵ Па и $t=273$ К. При этом, согласно уравнению (1.12), объем, занимаемый 1 кмоль равен 22,4 м³. При нормальных условиях молекулярная концентрация воздуха $n=2,7 \cdot 10^{25}$ м⁻³. При среднеарифметической скорости $v_{ар}=400$ м/с частота соударений молекул с поверхностью твердого тела $N_q=2,7 \cdot 10^{27}$ м⁻² · с⁻¹, а объем газа, ударяющийся о поверхность твердого тела, $V_q=100$ м³/(с · м²).

Большинство составляющих воздуха при нормальных условиях являются газами. В виде пара присутствуют лишь H₂O, CO₂ и Xe. При $T=77$ К, которую имеют поверхности вакуумных ловушек, охлаждаемые жидким азотом, большинство составляющих воздуха переходит в парообразное состояние и лишь He, H₂ и Ne остаются газами.

Давление атмосферного воздуха зависит от высоты над уровнем моря. При изменении высоты на dz давление изменяется на $dp=-\rho g dz$, где ρ — плотность газа; $\rho=nm=pm/(kT)$; g — ускорение силы тяжести. Разделяя переменные, получим

$$\frac{dp}{p} = - \frac{m}{kT} dz.$$

После интегрирования имеем

$$\ln p = -\frac{mg}{kT}z + C \quad \text{или} \quad p = C \times \\ \times \exp\left(-\frac{mg}{kT}z\right).$$

Постоянная интегрирования C при $z=0$ равна давлению газа p_0 у поверхности Земли, поэтому

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{mg}{kT}z\right). \quad (1.36)$$

Полученное выражение называется формулой Больцмана, из которой следует, что при подъеме на каждые 15 км давление воздуха уменьшается примерно на один порядок. На рис. 1.4 показано изменение атмосферного давления на различной высоте от поверхности Земли.

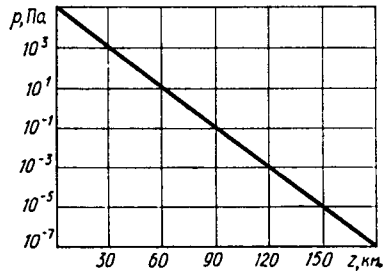


Рис. 1.4. Атмосферное давление на различных высотах от поверхности Земли

§ 1.6. Средняя длина свободного пути

Направленный молекулярный поток, содержащий в начальный момент N_0 молекул газа, за счет столкновений с хаотически движущимися молекулами с частотой K за время dt уменьшается на величину $dN = -KNdt$. Пронтегрировав это выражение, получим

$$N = N_0 e^{-Kt} = N_0 e^{-l/l}.$$

Здесь $L = v/K$ — средняя длина свободного пути молекул газа, определяемая отношением скорости молекул к числу столкновений в единицу времени; $l = vt$ — длина пути молекулы за время t .

Столкновение молекул произойдет, если расстояние между центрами молекул не более диаметра молекулы d_m (рис. 1.5). Будем считать, что одна молекула имеет радиус d_m , а все остальные молекулы — математические точки с нулевым радиусом. При движении со скоростью v в газе с молекулярной концентрацией n за 1 с такая воображаемая молекула опишет объем $V = \pi d_m^2 v$ и испытает $K = n \pi d_m^2 v$ соударений. Средняя длина свободного пути в этом случае

$$L = \frac{v}{K} = \frac{1}{\pi d_m^2 n}. \quad (1.37)$$

С учетом относительных скоростей движения молекул газа, которые не учитывались при выводе выражения (1.37), для длины свободного пути можно получить более точное выражение

$$L = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d_m^2}. \quad (1.38)$$

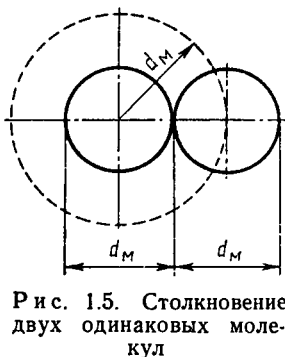


Рис. 1.5. Столкновение двух одинаковых молекул

Из формулы (1.38) видно, что при постоянной молекулярной концентрации длина свободного пути не должна зависеть от температуры. Однако из опытных данных следует, что при постоянной молекулярной концентрации с увеличением температуры длина свободного пути увеличивается. Зависимость длины свободного пути от температуры может быть учтена введением в (1.38) дополнительного множителя в знаменателе, получаемого экспериментально:

$$L = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d_M^2 (1 + C/T)} \quad (1.39)$$

Здесь C — постоянная Сезерленда, равная температуре, при которой в случае постоянной молекулярной концентрации газа средняя длина свободного пути молекул уменьшается вдвое по сравнению со значением, соответствующим бесконечно большой температуре. Значения постоянной C для различных газов представлены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Характеристики молекул некоторых газов

Газы	$m \cdot 10^{26}$ кг	$d_M \cdot 10^{10}$ м	C , К	$d_T \cdot 10^{10}$ м при t , К			
				600	293	77	4,2
N ₂	4,65	2,74	116	2,99	3,24	4,34	14,7
O ₂	5,31	3,01	125	3,31	3,60	4,88	16,7
Ar	6,63	3,00	142	3,34	3,66	5,06	17,7
CO ₂	7,31	3,36	254	4,01	4,59	6,97	26,3
Ne	3,35	2,35	56	2,46	2,56	3,09	8,90
Kr	19,9	3,17	188	3,63	4,06	5,88	21,4
H ₂	0,33	2,41	84	2,57	2,73	3,48	11,0
He	21,8	3,53	252	4,21	4,81	7,30	27,6
H ₂ O	2,99	2,53	659	3,66	4,56	7,82	31,8
Воздух	4,81	3,13	112	3,41	3,68	4,90	16,5
He	0,66	1,94	80	2,07	2,19	2,77	8,69

Примечание. Диаметры молекул d_M определены из вязкости газов.

Для учета взаимодействия молекул газа между собой (взаимного притяжения) вводят понятие эффективного диаметра молекулы d_T :

$$d_T^2 = d_M^2 (1 + C/T) \quad (1.40)$$

Эффективный диаметр молекулы уменьшается с увеличением температуры газа.

Формулу (1.39) можно представить с учетом (1.40) в виде

$$L = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d_m^2 n}.$$

Используя уравнение газового состояния (1.10), выражение (1.40) можно преобразовать:

$$L = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d_m^2 (1 + C/T)} = \frac{kT^2}{\sqrt{2} \pi d_m^2 (T + C)}. \quad (1.41)$$

Для воздуха при $T=293$ К и давлении 1 Па из (1.4) следует, что $L_1=6,7 \cdot 10^{-3}$ м·Па. При любом другом давлении

$$L = \frac{L_1}{p} = \frac{6,7 \cdot 10^{-3}}{p}, \quad (1.42)$$

где p — в Па, L — в м.

При расчетах длины свободного пути молекул газа при различных температурах и постоянном давлении на основании (1.41) можно получить следующее выражение:

$$L_T = L_0 \frac{T^2(T_0 + C)}{T_0^2(T + C)} = bL_0, \quad (1.43)$$

где

$$b = \frac{T^2(T_0 + C)}{T_0^2(T + C)}.$$

В табл. 1.6 приведены средние длины свободного пути молекул различных газов.

Таблица 1.6

Средняя длина свободного пути молекул различных газов при давлении 1 Па

Газы	$L_1 \cdot 10^3$, м·Па при t , К				Газы	$L_1 \cdot 10^3$, м·Па при t , К			
	600	293	77	4,2		600	293	77	4,2
N ₂	20,8	8,67	1,26	0,0061	H ₂	28,2	12,2	0,197	0,0108
O ₂	16,9	7,02	1,00	0,0047	Xe	10,5	3,93	0,448	0,0017
Ar	16,7	6,79	0,933	0,0042	H ₂ O	13,9	4,38	0,391	0,0013
CO ₂	11,6	4,32	0,492	0,0019	Воздух	16,0	6,72	0,995	0,0048
Ne	30,7	13,9	2,50	0,0165	He	43,6	19,1	3,13	0,0174
Kr	14,1	5,52	0,691	0,0029					

В случае смеси двух газов, молекулы которых имеют массы m_1 и m_2 , среднюю длину свободного пути L_1 частицы с массой m_1

рассчитывают по формуле

$$L_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi n_1 d_{T_1}^2 + \pi n_2 d_{12}^2} \sqrt{1 + m_1/m_2}}. \quad (1.44)$$

Здесь d_{T_1} — эффективный диаметр молекул с массой m_1 и концентрацией n_1 ; $d_{12} = \frac{1}{2}(d_{T_1} + d_{T_2})$; d_{T_2} — эффективный диаметр молекулы с массой m_2 и концентрацией n_2 .

Первое слагаемое в знаменателе (1.44) зависит от столкновения одинаковых частиц с массой m_1 , а второе — от столкновения частиц с массами m_1 и m_2 . Если $n_1 \ll n_2$, то получим более простое выражение:

$$L_1 = \frac{1}{\pi n_2 d_{12}^2 \sqrt{1 + m_1/m_2}}. \quad (1.45)$$

§ 1.7. Понятие о степенях вакуума

Многие физические процессы в вакууме сильно зависят от отношения между числом взаимных столкновений молекул и числом столкновений молекул со стенками вакуумной системы.

Частота столкновений между молекулами K_m обратно пропорциональна средней длине свободного пути: $K_m = v_{ap}/L$. Из общего числа соударений молекул со стенками камеры $n v_{ap} F/4$, приходящихся на nV молекул, легко рассчитать среднее число соударений со стенкой K_c , приходящихся в единицу времени на одну молекулу: $K_c = v_{ap} F / (4V) = v_{ap} / d_{эф}$, где F — площадь поверхности стенок, соприкасающихся с разреженным газом; V — объем камеры; $d_{эф} = 4V/F$ — эффективный размер вакуумной камеры.

Для молекул газа внутри сферического сосуда диаметром D эффективный размер камеры $d_{эф} = \frac{2}{3}D$, для трубы бесконечной длины с диаметром D получим $d_{эф} = D$, а для двух бесконечных параллельных поверхностей, расположенных на расстоянии D друг от друга, — $d_{эф} = 2D$.

Отношение K_c/K_m называется критерием Кнудсена:

$$Kn = K_c/K_m = L/d_{эф}. \quad (1.46)$$

В зависимости от значения этого критерия различают вакуум низкий, средний и высокий.

Низкий вакуум — это состояние газа, при котором взаимные столкновения между молекулами преобладают над столкновениями молекул газа со стенками вакуумной камеры. Такое состояние газа соответствует условию $Kn \ll 1$. При этом длина свободного пути молекул газа значительно меньше размеров вакуумной камеры. Из условия изменения режима течения газа принимают

$K_p \leq 5 \cdot 10^{-3}$. При напылении в низком вакууме столкновения молекул газа с молекулами распыляемого вещества не дают возможность получить на стенках камеры изображение экрана, поставленного на пути молекулярного пучка.

Средний вакуум — это состояние газа, когда частоты соударений молекул друг с другом и со стенками вакуумной камеры одинаковы, при этом $L \approx d_{3\phi}$, а $K_p \approx 1$.

Высокий вакуум — это состояние газа, при котором столкновения молекул газа со стенками вакуумной камеры преобладают над взаимными столкновениями молекул газа. При этом $K_p > 1$. В этом случае изображение экрана, поставленного на пути молекулярного пучка, получается отчетливым. Из условия изменения режима течения газа принимают $K_p \geq 1,5$. Тогда условие существования среднего вакуума можно записать в виде $5 \cdot 10^{-3} < K < 1,5$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В вакуумной установке при $t = 293$ К создан высокий вакуум, соответствующий давлению 10^{-9} Па. Сколько молекул останется при этом в 1 м³?
2. Как изменится давление газа, если при неизменном объеме и температуре половину молекул заменить молекулами в два раза более тяжелого газа?
3. Чему равна максимально возможная быстрота откачки вакуумного насоса, откачивающего вакуумную камеру при $T = 293$ К, если площадь его входного отверстия равна $0,1$ м²?
4. Определить давление атмосферного воздуха на высоте 30 км, если на уровне моря оно равно 10^5 Па?
5. Чем вызвано разделение вакуума по степеням: низкий, средний, высокий?
6. Каково соотношение между наиболее вероятной, среднеквадратичной и среднеарифметической скоростями газовых молекул?
7. Определить, чему равен критерий Кнудсена, если вакуумная камера сферической формы и диаметром $0,5$ м заполнена воздухом при $T = 293$ К и давлении 10^{-8} Па.
8. Найти среднюю длину свободного пути молекул воздуха при давлении 10^{-8} Па и $T = 293$ К.
9. Как изменится длина свободного пути молекул азота при изменении температуры от 300 до 600 К?
10. Каковы давления воздуха в сферической вакуумной установке диаметром $0,5$ м и при $T = 293$ К, соответствующие переходу от низкого к среднему и от среднего к высокому вакууму?

ГЛАВА 2

СОРБЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ВАКУУМЕ

§ 2.1. Энергия взаимодействия

По мере снижения рабочего давления роль поверхностных явлений при получении и измерении вакуума непрерывно возрастает. Развитие откачных устройств и повышение точности измере-

ний давления в области сверхвысокого вакуума невозможны без изучения сорбционных процессов на границе газ — твердое тело.

Процесс поглощения газов или паров твердыми телами независимо от того, происходит он на поверхности или в объеме твердого тела, называется сорбцией, а процесс поглощения газов на поверхности твердых тел — адсорбцией. Различают физическую адсорбцию и хемосорбцию. Энергия взаимодействия молекул газа с поверхностью при физической адсорбции значительно меньше, чем при хемосорбции. Абсорбция — это поглощение газов в объеме твердых тел. В процессе абсорбции происходит растворение газа в объеме твердого тела.

Вещество, поглощающее газ, называется сорбентом (адсорбентом, абсорбентом), а поглощаемое вещество — сорбатом (адсорбатом, абсорбатом). Выделение газов из твердого тела называется десорбцией.

Сорбция — процесс экзотермический. При поглощении молекул газа выделяется энергия сорбционного взаимодействия, имеющая физическую и химическую природу.

Физическая составляющая энергии взаимодействия определяется несколькими эффектами, обеспечивающими притяжение и отталкивание молекул.

Индукционный эффект притяжения при взаимодействии постоянного и индуцированного диполей имеет место, когда хотя бы одна из взаимодействующих молекул обладает постоянным дипольным моментом. *Ориентационный эффект притяжения* наблюдается для двух вращающихся молекул с постоянными дипольными моментами. *Дисперсионный эффект притяжения* объясняется взаимодействием флуктуирующих диполей, которые создаются электронами, вращающимися вокруг ядра.

Энергию притяжения при физическом взаимодействии можно рассчитать по формуле

$$Q_{\Phi} = \frac{2\mu_0^2\alpha_0}{r^3} + \frac{2}{3} \frac{\mu_0^4}{kTr^6} + \frac{3}{4} \frac{\alpha_0^2 J}{r^6}, \quad (2.1)$$

где r — расстояние между молекулами; μ_0 — дипольный момент молекулы; α_0 — поляризуемость; J — потенциал ионизации.

Порядок слагаемых в (2.1) соответствует последовательно энергии притяжения индукционного, ориентационного и дисперсионного эффектов взаимодействия. Величины этих эффектов для двух одинаковых молекул представлены в табл. 2.1.

Для полярных молекул H_2O и NH_3 существенную часть всей энергии взаимодействия составляет ориентационный эффект. неполярные молекулы взаимодействуют только за счет дисперсионного эффекта, возрастающего с увеличением атомного числа. Индукционный эффект мал для всех рассматриваемых молекул.

Энергия притяжения при физическом взаимодействии обратно

Таблица 2.1

Индукционные, ориентационные и дисперсионные энергии взаимодействия двух одинаковых молекул

Газы	Общая энергия взаимодействия $\cdot 10^{10}$, Дж·м ⁶	$2\mu^2\alpha \cdot 10^{10}$		$\frac{2}{3} \frac{\mu^4}{kT} \cdot 10^{10}$		$\frac{3}{4} \alpha^2 J \cdot 10^{10}$	
		Дж·м ⁶	%	Дж·м ⁶	%	Дж·м ⁶	%
H ₂ O	247	10	4	190	77	47,0	19,0
CO	67,6	$57 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$34 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	65,7	99,9
NH ₃	187	10	5,35	84	45	93,0	49,6
HJ	384	1,68	0,44	$35 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	382	99,5
N ₂	57,2	—	—	—	—	57,2	100
O ₂	39,8	—	—	—	—	39,8	100
H ₂	11,4	—	—	—	—	11,4	100
He	1,49	—	—	—	—	1,49	100
Ne	7,97	—	—	—	—	7,97	100
Ar	69,5	—	—	—	—	69,5	100

пропорциональна шестой степени расстояния между взаимодействующими молекулами.

При химическом взаимодействии энергия притяжения Q_x объясняется возникновением ковалентной или ионной связи.

Ковалентная связь образуется двумя электронами с противоположно направленными спинами, причем эта электронная пара принадлежит двум атомам. При ионной связи осуществляется взаимное электростатическое притяжение противоположно заряженных ионов. Химическая связь в ряде случаев может носить смешанный характер.

Отталкивание объясняется взаимодействием положительно заряженных ядер сближающихся молекул. Энергия отталкивания обратно пропорциональна двенадцатой степени расстояния между молекулами: $Q_0 = B/r^{12}$.

С учетом всех эффектов энергию взаимодействия между двумя молекулами можно записать в виде $\Delta Q = Q_0 - Q_\Phi - Q_x$. При $\Delta Q = 0$ наблюдается положение равновесия, при котором энергии отталкивания и притяжения одинаковы.

Для нахождения энергии взаимодействия молекулы с поверхностью твердого тела необходимо просуммировать энергии взаимодействия молекулы с каждым атомом кристаллической решетки твердого тела. Если расстояние между молекулой газа и поглощающей поверхностью велико по сравнению с расстоянием между атомами адсорбента, то можно применить интегрирование по объему. Энергия взаимодействия молекулы с твердым телом

$$\varphi = \int V Q n_a dV, \quad (2.2)$$

где n_a и V — концентрация и объем атомов адсорбента.

После интегрирования составляющая энергии, обеспечивающая физическое притяжение, будет обратно пропорциональна третьей степени, а отталкивание — девятой степени расстояния между молекулой и поверхностью.

При физической адсорбции энергия взаимодействия обычно не превышает $100 \cdot 10^6$ Дж/кмоль. Теплота физической адсорбции некоторых газов на углеводе представлена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Теплоты физической адсорбции Q_a и теплоты испарения E некоторых газов на углеводе

Теплоты	Воздух	CO ₂	H ₂ O	Пары масел	H ₂	CO
$Q_a \cdot 10^{-6}$ Дж/кмоль	12 ... 20	28 ... 33	92	90 ... 100	9	12,6
$E \cdot 10^{-6}$ Дж/кмоль	5,7	25,3	45,3	96	0,8	6,3

Продолжение табл. 2.2

Теплоты	Ar	CH ₄	N ₂	O ₂	He	Ne
$Q_a \cdot 10^{-6}$ Дж/кмоль	14,7	18	11 ... 19	13 ... 20	2	4,2
$E \cdot 10^{-6}$ Дж/кмоль	6,5	9,2	5,6	6,8	0,008	1,8

Энергия взаимодействия для хемосорбции значительно больше, чем для физической адсорбции, и лежит в пределах $(100 \dots 400) \cdot 10^6$ Дж/кмоль. Теплота хемосорбции различных веществ на углеводе представлена в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Теплоты хемосорбции некоторых веществ на углеводе

Теплота	C	H	N	O	S	F	Cl	Br	J
$Q_x \cdot 10^{-6}$ Дж/кмоль	344	415	292	350	259	441	238	276	240

Уравнение (2.2) можно представить в графической форме в виде потенциальных кривых, показанных на рис. 2.1. С приближением к поверхности молекула вначале оказывается в первой потенциальной яме. При этом наблюдается физическая адсорбция. Молекула с энергией поступательного движения $kT/2$ будет колебаться внутри потенциальной ямы между $r_{\phi 1}$ и $r_{\phi 2}$.

Если энергия молекулы более $\phi_{\phi} + \phi_{\text{акт}}$, то югоатомная молекула диссоциирует на атомы, которые могут химически взаимодей-

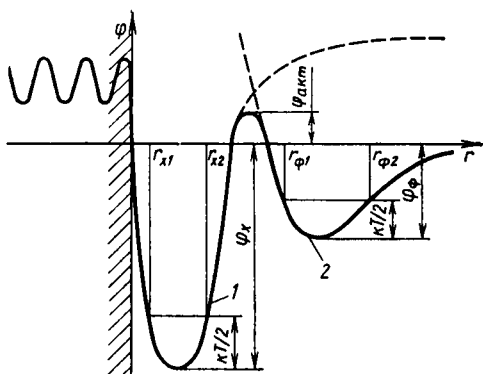


Рис. 2.1. Потенциальная энергия взаимодействия многоатомных молекул с поверхностью твердого тела:

1 — для хемосорбции; 2 — для физической адсорбции

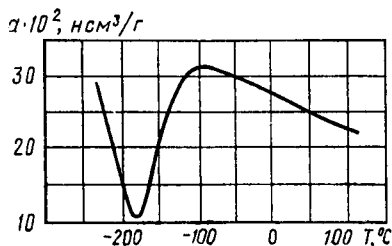


Рис. 2.2. Изобара поглощения водорода на никелевом порошке при давлении $2,7 \cdot 10^4$ Па

ствовать с поверхностью. При этом атомы попадают во вторую потенциальную яму и колеблются в ней между r_{x1} и r_{x2} .

Следующим этапом процесса поглощения является абсорбция, которая характеризуется переходом хемосорбированных молекул газа в кристаллическую решетку твердого тела.

Десорбция газа наблюдается в обратном порядке. Молекулы из твердого тела переходят в хемосорбированное состояние, откуда при достаточно высокой энергии молекул $kT/2 > \varphi_x + \varphi_{акт}$ они могут покинуть поверхность. Для удаления молекул, находящихся в первой потенциальной яме, должно соблюдаться условие $kT/2 > \varphi_{\phi}$. Для реальных поверхностей с дефектами кристаллической решетки теплота адсорбции не имеет постоянного значения и описывается функцией распределения.

Равновесное количество поглощенного водорода на никелевом порошке при различных температурах показано на рис. 2.2. При повышении температуры от -225 до -175°C количество поглощенного водорода убывает согласно закономерностям физической адсорбции. После минимума при -175°C наблюдается увеличение количества поглощаемого газа, связанного с хемосорбцией. Для удаления хемосорбированного газа в данном случае требуется нагреть адсорбент до температуры 300 — 400°C .

Теплота адсорбции изменяется при перемещении по поверхности тела. Для идеальных поверхностей эти изменения связаны с периодичностью кристаллической решетки. Величина потенциального барьера при движении молекул по касательной к поверхности называется теплотой миграции. Она связана с теплотой адсорбции следующим соотношением: $Q_m = zQ_a$, где z — коэф-

эффициент пропорциональности. Для кубической решетки $z=1/2$, а для гексагональной — $z=2/3$.

Реальные соотношения между теплотой адсорбции и теплотой миграции за счет дефектов в решетке могут существенно отличаться от идеальных.

§ 2.2. Время адсорбции

Минимальным временем адсорбции можно считать период колебания молекулы в потенциальной яме. Это время $\tau_0=10^{-13}$ с можно считать приблизительно одинаковым для всех молекул газа. Время адсорбции определяется теплотой адсорбции и может быть рассчитано по формуле Френкеля:

$$\tau_a = \tau_0 e^{Q_a/(RT)}, \quad (2.3)$$

где Q_a — теплота адсорбции. Время адсорбции основных составляющих воздуха ($Q_a=20 \cdot 10^6$ Дж/кмоль) при комнатной температуре составляет $\sim 10^{-10}$ с, а при температуре жидкого азота ~ 1 с (рис. 2.3). Для паров воды и масел теплота физической адсорбции $\sim 80 \cdot 10^6$ Дж/кмоль, что соответствует времени адсорбции 10^2 с при $T=293$ К и 10^{43} с при $T=77$ К. Гелий имеет теплоту адсорбции $2 \cdot 10^6$ Дж/кмоль, а время его адсорбции даже при $T=77$ К близко к минимальному 10^{-13} с. Поглощение He на гладких поверхностях становится заметным только при $T < 4$ К.

Для хемосорбции при теплотах адсорбции более $100 \cdot 10^6$ Дж/кмоль время адсорбции настолько велико, что адсорбционные процессы при комнатной температуре становятся необратимыми при изменении давления газа над поверхностью адсорбента. Вернуть систему в первоначальное состояние можно лишь повышением температуры. При физической адсорбции время адсорбции мало и наблюдается обратимость количества поглощенного газа в зависимости от давления в газовой фазе.

Время перехода молекулы на поверхности из одной потенциальной ямы в другую называется временем миграции τ_m и определяется, как и время адсорбции, соотношением

$$\tau_m = \tau_0 e^{Q_m/(RT)}, \quad (2.4)$$

где Q_m — теплота миграции.

Для больших τ_m молекулы газа локализованы и не перемещаются по поверхности твердого тела.

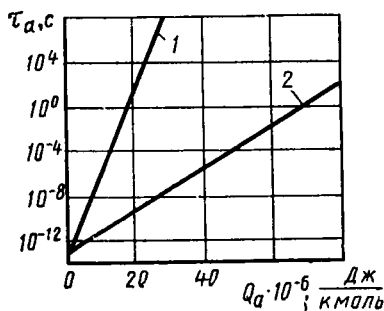


Рис. 2.3. Зависимость времени адсорбции от теплоты адсорбции: 1 — 77 К; 2 — 293 К

Число скачков, которые совершит молекула за время адсорбции, определяется соотношением

$$N_m = \frac{\tau_a}{\tau_m} = \exp \left[\frac{Q_a(1-z)}{RT} \right].$$

Средний путь, который проходит молекула за время адсорбции в веществе, имеющем кристаллическую решетку,

$$L_m = N_m A = A \exp \left[\frac{Q_a(1-z)}{RT} \right], \quad (2.5)$$

где A — постоянная решетки.

Например, за время адсорбции молекула газа, имеющая теплоту адсорбции $Q_a = 80 \cdot 10^6$ Дж/кмоль, при $T = 293$ К по поверхности тела с идеальной кубической решеткой ($A = 0,5$ нм и $z = 0,5$) совершит число скачков $N_m = 2,5 \cdot 10^7$, что соответствует пути $L_m = 1,25$ см. При наличии дефектов поверхности в виде щелей и трещин этот путь может быть значительно больше.

§ 2.3. Конденсация и испарение

Вещества в зависимости от температуры и давления могут находиться в различных агрегатных состояниях. Для вакуумной техники наибольший интерес представляет область низких давлений, в которой возможны процессы перехода из парообразного состояния в жидкое (конденсация) и обратный процесс (испарение), из парообразного состояния в твердое (десублимация) и обратный процесс (сублимация).

На рис. 2.4 приведена диаграмма агрегатного состояния вещества, а критические параметры некоторых газов: критическая температура $T_{кр}$ и параметры тройной точки T_v и p_v — даны в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Критические параметры некоторых газов

Параметры	H ₂ O	Kr	CO ₂	N ₂	O ₂	Ar	H ₂	Ne
$T_{кр}, K$	647	209	304	126	155	151	33,2	44,4
T_v, K	273	116	217	63,2	54,4	83,8	13,9	24,5
$p_v, Па$	560	$7,7 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^4$	146	$1,5 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^3$	$4,3 \cdot 10^4$

Кривую abc на рис. 2.4, определяющую давление насыщенного пара при давлениях, меньших 100 Па, можно описать приближенным уравнением

$$\lg p_T = M - N/T, \quad (2.6)$$

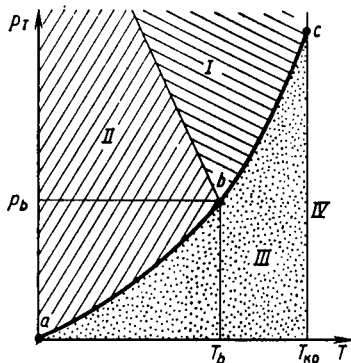


Рис. 2.4. Диаграмма агрегатного состояния вещества:

I — жидкость; *II* — твердое тело; *III* — пар; *IV* — газ

где p_T — давление насыщенного пара при температуре T ; M и N — константы, зависящие от рода вещества (табл. 2.5).

Более точные значения давления насыщенных паров различных веществ, определенные экспериментально, показаны на рис. 2.5.

Давления насыщенных паров различных органических и полимерных материалов, часто применяемых в вакуумной технике в качестве уплотнителя, при комнатной температуре приведены в табл. 2.6.

Давление насыщенных паров сплавов приблизительно определяется законом Рауля

$$p_{AS}/p_A = n_A/(n_A + n_B) = X_A, \quad (2.7)$$

где p_A — давление насыщенных паров вещества A ; p_{AS} — давление насыщенных паров вещества A , являющегося растворителем вещества B ; n_A и n_B — количество молей веществ A и B в растворе.

Таблица 2.5

Константы уравнения (2.6)

Константы	Cu	Al	Zn	Ni	Fe	Cr	N ₂
M	11,08	10,91	10,00	11,87	11,56	12,06	24,1
$N \cdot 10^3$	16,98	15,94	14,87	20,96	19,97	20,00	$8,9 \cdot 10^5$

Таблица 2.6

Давление насыщенных паров вакуумных масел при комнатной температуре

Характеристика	Трансформаторное масло при $T=307$ К	Замазка Рамзая	Пицеин	ВМ-4	ВМ-1
		$T=293$ К			
Давление насыщенных паров, Па	10^{-1}	10^{-3}	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$

Содержание вещества A в растворе можно выразить в весовых процентах:

$$q_A = \frac{100 X_A M_A}{X_A M_A + (1 - X_A) M_B},$$

где M_A и M_B — молярные массы веществ A и B .

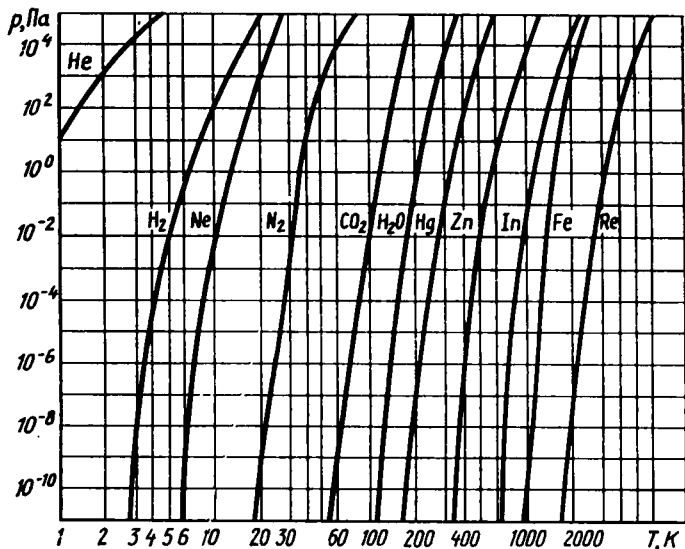


Рис. 2.5. Зависимость давления насыщенных паров различных веществ от температуры

На рис. 2.6 показана в качестве примера температурная зависимость давления паров цинка для сплава цинка с медью при различных значениях молярной доли меди X_{Cu} . Как видно из рисунка, при постоянной температуре увеличение молярной доли меди в сплаве существенно снижает давление паров цинка.

Массовый поток газа, падающий на единицу поверхности в единицу времени, равен произведению N_q из (1.13) на массу молекулы газа и может быть представлен в виде

$$G = m N_q = p_r \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}, \quad (2.8)$$

где p_r и T_r — давление, Па, и температура газа, К; G выражается в $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, если молекулярная масса M — в $\text{кг}/\text{кмоль}$, а $R = 8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

Скорость конденсации

$$G_k = \gamma G = \gamma p_r \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}, \quad (2.9)$$

где γ — вероятность конденсации молекулы газа, взаимодействующей с поверхностью твердого тела.

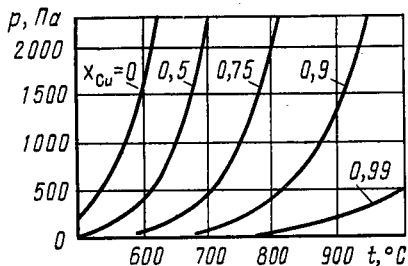


Рис. 2.6. Давление насыщенных паров цинка в сплаве с медью

Если известна теплота адсорбции φ_a молекулы на поверхности твердого тела, то коэффициент γ можно определить как долю молекул, энергии которых меньше φ_a . Воспользовавшись интегральным распределением молекул по энергиям (1.21), запишем выражение для вероятности конденсации:

$$\gamma = \int_0^{\infty} V \sqrt{\frac{4x}{\pi}} e^{-x} dx, \quad (2.10)$$

где $x = \varphi_a / (kT)$. Значения $\gamma(x)$ можно определить по табл. 1.3, воспользовавшись равенством $\gamma(x) = F(x)$.

При давлении насыщенного пара на поверхности существует динамическое равновесие процессов конденсации и испарения. Скорости конденсации G_k и испарения G_n вещества при этом одинаковы, что позволяет определить скорость испарения:

$$G_n = p_T \gamma \sqrt{M / (2\pi RT)}, \quad (2.11)$$

где p_T — давление насыщенного пара при температуре T .

Скорость массообмена на поверхности

$$\begin{aligned} G &= G_k - G_n = (p_T - p) \gamma \sqrt{M / (2\pi RT)} = \\ &= 4,38 \cdot 10^{-3} (p - p_T) \gamma \sqrt{M/T}. \end{aligned}$$

При $p > p_T$ происходит осаждение, а при $p < p_T$ — удаление вещества с поверхности тела.

Процессы сублимации — десублимации описываются такими же выражениями.

В табл. 2.7 приведены скорости испарения различных веществ, соответствующих давлению насыщенного пара 1,33 Па.

Таблица 2.7

Скорости испарения некоторых веществ

Свойство	Cu	Ag	Zn	Ni	Fe	Cr
T, K	1545	1480	615	1670	1740	1665
Скорость испарения, $кг/(м^2 \cdot с)$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}

Конденсация вещества идет с выделением теплоты. Теплоты конденсации можно определить по константе N из урав-

нения (2.6):

$$E = 2,3RN. \quad (2.12)$$

При изучении молекулярных потоков в высоком вакууме важно знать направление испаряющихся молекул.

Испарение из точечного источника соответствует изотропному распределению, при котором вероятность вылета молекул внутри телесного угла $d\omega$

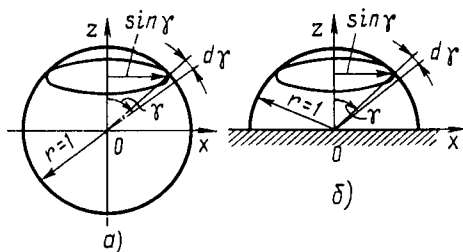


Рис. 2.7. Схема испарения молекул из источников:

a — точечного; *b* — плоского

$$dP = d\omega / (4\pi). \quad (2.13)$$

Если воспользоваться определением телесного угла $d\omega = 2\pi \sin \gamma d\gamma$ (рис. 2.7, *a*), то $dP = \sin \gamma d\gamma / 2$, а полная вероятность

вылета молекул внутри сферы $P = \int_0^\pi \sin \gamma d\gamma / 2 = 1$.

Вероятность вылета молекул с поверхности тела, как было доказано экспериментально, пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности и направлением вылета (рис. 2.7, *b*):

$$dP = A \frac{d\omega}{2\pi} \cos \gamma, \quad (2.14)$$

где A — коэффициент пропорциональности (из условия нормировки $\int_0^{\pi/2} dP = 1$), равный двум.

Таким образом, вероятность вылета молекул с поверхности равна удвоенному произведению относительного телесного угла на косинус угла между нормалью к поверхности и направлением вылета (косинусный закон).

Интегрируя (2.14) в пределах от 0 до γ , при $A=2$ и $d\omega = 2\pi \sin \gamma d\gamma$ найдем долю молекул, вылетающих внутри угла γ :

$$\xi = \int_0^\gamma \sin 2\gamma d\gamma = \sin^2 \gamma. \quad (2.15)$$

Из (2.15) следует выражение для определения угла γ , соответствующего заданной доле молекулярного потока ξ :

$$\gamma = \arcsin \sqrt{\xi}. \quad (2.16)$$

Эта формула широко применяется при математическом моделировании молекулярных потоков в высоковакуумных системах.

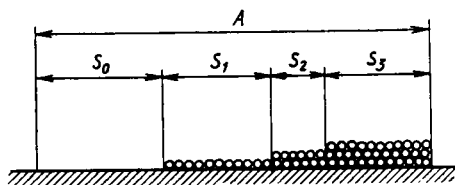


Рис. 2.8. Модель многослойной адсорбции

Адсорбционные процессы изучаются по кривым адсорбции, устанавливающим зависимость между тремя основными величинами: количеством поглощенного газа a , равновесным давлением p и температурой T . Различают три основных типа кривых адсорбции:

изотерма $a = F(p)$ при $T = \text{const}$, изобара $a = F(T)$ при $p = \text{const}$ и изостера $p = F(t)$ при $a = \text{const}$. Чаще всего пользуются изотермами адсорбции, которые легче всего получить или проверить экспериментальным путем.

Для вывода уравнения изотермы многослойной, полимолекулярной адсорбции сделаем следующие допущения: 1) теплота адсорбции в первом слое постоянная и не зависит от количества поглощенного газа; 2) теплота адсорбции во втором и всех последующих слоях равна теплоте конденсации; 3) значение вероятности конденсации и минимальное время адсорбции одинаковы для всех адсорбционных слоев.

На рис. 2.8 показана условная модель многослойной адсорбции. Молекулы адсорбированы на поверхности в несколько слоев.

Для облегчения расчета свободной поверхности все молекулы условно сдвинуты вправо.

Уравнение полимолекулярной адсорбции было получено Брунауэром, Эмметом и Тейлором и известно под названием уравнения БЭТ:

$$\frac{a}{a_m} = \frac{Cp/p_T}{(1 - p/p_T)[1 + (C - 1)p/p_T]}, \quad (2.17)$$

где a — количество адсорбата на единице поверхности адсорбента; a_m — количество адсорбата, необходимого для мономолекулярного покрытия адсорбента; p — равновесное давление в газовой фазе; p_T — давление насыщенных паров адсорбата при температуре T ; K ; C — константа, зависящая от разности теплот адсорбции Q_a и конденсации E ; $C = \exp[(Q_a - E)/(RT)]$; R — универсальная газовая постоянная.

Теплоты адсорбции и конденсации некоторых газов приведены в табл. 2.2.

Уравнение (2.17) при $Q_a > E$ дает S-образную изотерму адсорбции (рис. 2.9, а), а при $Q_a \leq E$ — островковую изотерму адсорбции (рис. 2.9, б). При островковой изотерме адсорбции поглощение молекул газа на занятой поверхности более вероятно,

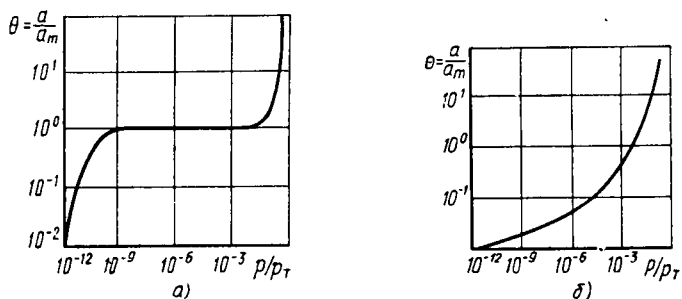


Рис. 2.9. Изотермы многослойной адсорбции:
 а — S-образная изотерма; б — островковая изотерма

чем на свободной. Это приводит к образованию на поверхности многослойных участков поглощенного газа.

Для очень низких давлений $p \ll p_T/C$ S-образная изотерма переходит в линейную (рис. 2.10, а) и описывается уравнением Генри

$$a/a_m = bp, \quad (2.18)$$

где b — постоянная, зависящая от температуры; $b = C/p_T$.

Для низких давлений $p \ll p_T$ S-образная изотерма дает изотерму мономолекулярной адсорбции (рис. 2.10, б)

$$a/a_m = bp/(1 + bp). \quad (2.19)$$

Уравнение (2.19) известно под названием уравнения Ленгмюра и характерно для хемосорбционных процессов.

На рис. 2.11 показана изотерма ($T = 293$ К) паров вакуумного масла, имеющего $Q_a = 96 \cdot 10^6$ Дж/кмоль, $E = 96 \cdot 10^6$ Дж/кмоль и

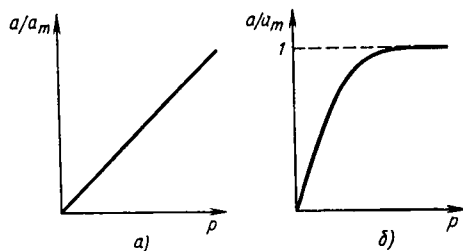


Рис. 2.10. Изотермы мономолекулярной адсорбции:
 а — изотерма Генри; б — изотерма Ленгмюра

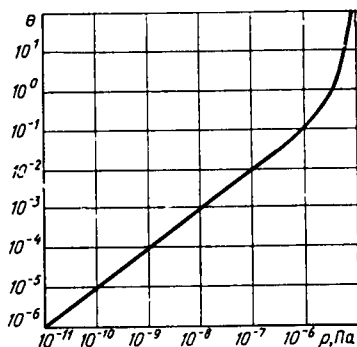


Рис. 2.11. Изотерма адсорбции паров масла при комнатной температуре

давление насыщенного пара при комнатной температуре $p_T = 10^{-5}$ Па. Изотерма рассчитана по уравнению (2.17).

Уравнение (2.17) при $a = G/A$ можно преобразовать к виду

$$\frac{p/p_T}{1 - p/p_T} = \frac{G}{a_m C A} + \frac{G(C-1)p}{A a_m C p_T},$$

где G — общее количество адсорбированного газа; A — полная поверхность адсорбента.

Обработывая экспериментальные данные $G=f(p)$ в координатах $\frac{p/p_T}{1 - p/p_T}$ и p/p_T , относительно которых записанное уравнение линейно, можно найти две константы: A и C .

Константа C позволяет по известной теплоте конденсации рассчитать теплоту адсорбции.

Рассмотрим вывод уравнения (2.17). Условие адсорбционного равновесия для многослойной адсорбции (рис. 2.8) запишем в виде равенства скоростей конденсации в предыдущем адсорбционном слое и испарения в последующем слое:

$$\mu_i S_i = v_{i+1} S_{i+1}. \quad (2.20)$$

Удельная скорость конденсации молекул в i -слое

$$\mu_i = f_i N_q, \quad (2.21)$$

где f_i — вероятность конденсации молекул в i -слое, N_q — число молекул, удаляющихся в единицу времени с единицу поверхности. Воспользовавшись выражениями (1.14) и (1.18), перепишем (2.21) в виде

$$\mu_i = \frac{f_i p}{\sqrt{2\pi m k T}}. \quad (2.22)$$

Удельная скорость испарения молекул

$$v_i = \frac{a_i}{\tau_{0i}}, \quad (2.23)$$

где a_i — количество молекул, адсорбированных на единицу поверхности; τ_{0i} — время адсорбции молекул в i -слое.

С учетом выражения для времени адсорбции (2.3) уравнение (2.23) перепишем в виде

$$v_i = \frac{a_i}{\tau_{0i}} \exp\left(-\frac{Q_{a_i}}{RT}\right). \quad (2.24)$$

Согласно сделанным ранее допущениям, минимальное время адсорбции и вероятности конденсаций постоянны для всех слоев, т. е. $\tau_{01} = \tau_{02} = \dots = \tau_{0i} = \dots = \tau_0$, а $f_1 = f_2 = \dots = f_i = \dots = f$. Тогда условие (2.20) с учетом уравнений (2.22) и (2.24) можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} g p S_0 &= \exp[-Q_1/(RT)] S_1, \\ g p S_1 &= \exp[-Q_2/(RT)] S_2, \\ &\dots \\ g p S_{i-1} &= \exp[-Q_i/(RT)] S_i, \\ &\dots \end{aligned} \quad (2.25)$$

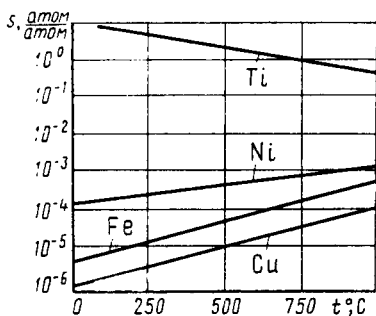


Рис. 2.12. Растворимость водорода в металлах при давлении 10^5 в зависимости от температуры

§ 2.5. Растворимость газов в твердых телах

Концентрация газов, растворенных в твердом теле, зависит от его температуры, давления и типа кристаллической решетки. В металлах, для которых характерна гомополярная металлическая связь между электроположительными атомами, зависимость растворимости от давления и температуры имеет следующий вид:

$$s = s_0 p^{1/n} \exp\left(\pm \frac{Q_s}{nRT}\right), \quad (2.29)$$

где n — число атомов в молекуле газа; Q_s — энергия активации при растворении; s_0 — постоянный коэффициент.

Знак «+» в формуле (2.29) характерен для газов, образующих с металлом химическое соединение, а знак «—» — для газов, образующих истинные растворы. Растворимость газов, образующих истинные растворы, с повышением температуры возрастает (H_2 в Cu, Fe и Ni), а образующих химические соединения — уменьшается (H_2 в Ti). Растворимость s , показанная на рис. 2.12, рассчитывается как отношение числа атомов водорода к числу атомов металла. Отметим также, что растворимость водорода в Ti значительно больше, чем в Ni, Fe и Cu.

Зависимость растворимости газов в металлах от давления представляет собой степенную функцию с показателем степени $1/n$. Это связано с тем, что газы растворяются в металлах в атомарном состоянии и перед растворением происходит диссоциация молекул на атомы. Например, для кислорода $n=2$, а реакция диссоциации имеет вид $O_2 \rightleftharpoons 2O$.

По закону действующих масс, константа равновесия такой реакции $K_C = p_0^2/p_{O_2}$; p_0 и p_{O_2} — давления атомарного и молекулярного кислорода.

Очевидно, что

$$p_0 = \sqrt{K_C p_{O_2}}. \quad (2.30)$$

Растворимость газов в металлах пропорциональна давлению диссоциированного газа. Для двухатомных молекул это равносильно пропорциональности корню квадратному из давления газа над поверхностью металла.

В неметаллах, атомы кристаллической решетки которых связаны между собой ионной или ковалентной связью, растворение газов происходит в молекулярном состоянии. Образуются истинные растворы, и зависимость растворимости газов от температу-

ры и давления имеет вид

$$s = s_0 p \exp \left[-\frac{Q_s}{RT} \right]. \quad (2.31)$$

Значения постоянных s_0 и Q_s , характеризующих растворимость основных газов в металлах и неметаллах, и значения растворимости s приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Растворимость газов в твердых телах

Абсорбент	Диапазон температур, °C	$s_0, \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{Па}^{1/n} \cdot \text{кг}}$	$Q_s \cdot 10^{-6}$ Дж/кмоль
<i>Водород</i>			
α -Fe	300 ... 900	0,17	-55,7
γ -Fe	900 ... 1400	0,20	-50,6
δ -Fe	1400 ... 1540	3,25	-12,9
Ni	200 ... 1400	0,10	-24,7
Нержавеющая сталь (18% Cr, 8% Ni)	400 ... 600	0,06	-19,7
Cu	400 ... 1000	0,18	-76,7
Mo	420 ... 1095	0,03	-58,7
Al	25 ... 690	Практически не растворяется	
Pt	400 ... 1300	0,60	-145
Ag	400 ... 900	0,02	-49,9
Pd	300 ... 1200	0,15	-9,63
<i>Азот</i>			
Cu, Ag	20 ... 400	Не растворяется	
Mo	936 ... 2400	1,92	-161
W	1200 ... 2400	1,09	-312
<i>Кислород</i>			
Fe	800 ... 1000	0,20	-17,5
Cu	600 ... 1050	0,24	-33,5

Абсорбционный процесс растворения газов в твердых телах осуществляется за счет диффузии молекул газа в кристаллическую решетку или по границам зерен. Диффузионный поток пропорционален градиенту концентрации. Так как для стационарного газового потока через стенку толщиной $2h$ градиент концентрации $ds/dx = (s_1 - s_2)/(2h)$, то

$$q = -D \frac{ds}{dx} = -D \frac{s_1 - s_2}{2h}, \quad (2.32)$$

где q — число молекул, проходящих в единицу времени через единицу площади поперечного сечения в направлении оси x ; D — коэффициент диффузии; s_1 и s_2 — концентрации газа на границах стенки.

При повышении температуры коэффициент D сильно возрастает:

$$D = D_0 \exp\left[-\frac{Q_D}{nRT}\right].$$

Здесь Q_D — энергия активации при диффузии; n — число атомов в молекуле газа для металлов, для неметаллов $n=1$; D_0 — коэффициент пропорциональности, не зависящий от температуры.

Значения D_0 и Q_D при диффузии газов в конструкционных материалах, приведенные в табл. 2.9, нужно рассматривать как приближенные в связи с тем, что на них влияют внутренние напряжения в материале. В тех случаях, когда диффузия происходит в основном по границам зерен и дефектам упаковки, необходимо дополнительно учитывать характер механической обработки, размеры и ориентацию кристаллов.

Таблица 2.9

Коэффициенты, характеризующие диффузию газов в металле

Коэффициенты	H ₂				
	α-Fe	сталь X18H9T	Ni	Cu	Mo
$D_0 \cdot 10^7$ м ² /с	1,5	1,1	2,04	11,0	0,73
$Q_D \cdot 10^6$ Дж/кмоль	14,7	49,4	72,9	153	174

Продолжение табл. 2.9

Коэффициенты	O ₂		N ₂	C ₀		C
	γ-Fe	Ni	Fe	α-Fe	Ni	Ni
$D_0 \cdot 10^7$ м ² /с	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	110	130	5,4	120
$Q_D \cdot 10^6$ Дж/кмоль	83,8	679	28,5	163	197	272

Подставляя в (2.32) выражение для D и s из (2.29), получим выражение для газопроницаемости металлов

$$q = K_0 \frac{p_2^{1/n} - p_1^{1/n}}{2h} \exp\left[-\frac{Q_D \pm Q_S}{nRT}\right], \quad (2.33)$$

где $K_0 = D_0 S_0$ — константа проницаемости.

Если градиент концентрации изменяется во времени, то в единице объема твердого тела происходит изменение концентрации

вещества, описываемое дифференциальным уравнением нестационарной диффузии

$$\frac{ds}{dt} = D \frac{d^2s}{dx^2}. \quad (2.34)$$

§ 2.6. Степени покрытия поверхности

Степень покрытия поверхности молекулами адсорбированных газов влияет на характер протекания поверхностных явлений: эмиссию электронов из твердого тела, поверхностный электрический разряд, сухое трение и износ, адгезию пленок и т. д.

Обозначим долю поверхности a/a_m , занятую адсорбированными молекулами, буквой θ и установим три степени покрытия поверхности: *высокую* ($\theta \gg 1$), *среднюю* ($\theta \approx 1$) и *низкую* ($\theta \ll 1$). Для расчета равновесных значений θ можно воспользоваться уравнением (2.17), позволяющим рассчитывать θ при любых степенях покрытия.

В тех случаях, когда время установления адсорбционного равновесия мало, θ не будут достигать равновесных значений. Для определения влияния времени установления адсорбционного равновесия на долю поверхности, покрытой слоем адсорбированных молекул, необходимо решить дифференциальное уравнение адсорбции на гладкой поверхности. Для случая мономолекулярной адсорбции оно может быть записано в следующем виде:

$$da/dt = \mu(1 - \theta) - \theta\phi, \quad (2.35)$$

где da/dt — удельная скорость адсорбции; μ — удельная скорость конденсации на свободной поверхности; ϕ — удельная скорость испарения с поверхности, покрытой мономолекулярным адсорбционным слоем.

Воспользовавшись выражениями (2.22) и (2.23), для удельных скоростей μ и ϕ перепишем уравнение (2.35):

$$\frac{da}{dt} = \frac{fp(1 - \theta)}{\sqrt{2\pi mkT}} - \frac{a_m}{\tau_a} \theta.$$

С учетом того, что $a = a_m\theta$, это уравнение можно преобразовать к виду

$$\frac{d\theta}{dt} + A\theta - B = 0. \quad (2.36)$$

Здесь

$$A = \frac{1}{\tau} + \frac{fp}{a_m \sqrt{2\pi mkT}}; \quad B = \frac{fp}{a_m \sqrt{2\pi mkT}}.$$

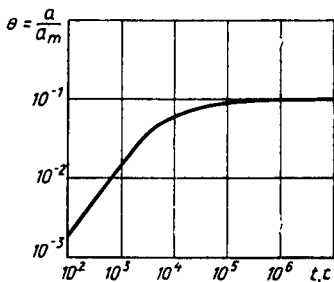


Рис. 2.13. Зависимость степени покрытия поверхности парами масла при давлении $1,3 \cdot 10^{-9}$ Па от времени

Решение уравнения (2.36) при начальных условиях $t=0$, $\theta=\theta_0$ имеет вид

$$\theta = \frac{B}{A} (1 - e^{-At}) + \theta_0 e^{-At}. \quad (2.37)$$

Его можно переписать следующим образом:

$$\theta = \frac{bp}{1 + bp} (1 - e^{-At}) + \theta_0 e^{-At}, \quad (2.38)$$

где

$$b = \frac{f \tau_0 \exp [Q_a / (RT)]}{a_m \sqrt{2\pi k T m}}.$$

При $t \rightarrow \infty$ равновесная степень покрытия $\theta_\infty = a_\infty / a_m = bp / (1 + bp)$.

Если принять за равновесное состояние $a = 0,99a_\infty$, то время достижения сорбционного равновесия при начальном условии $\theta_0 = 0$

$$t_p = 4,6 / A = 4,6 / \left[\frac{f p}{a_m \sqrt{2\pi k T}} + \frac{\exp [-Q_a / (RT)]}{\tau_0} \right]. \quad (2.39)$$

При адсорбции азота на графите для $p = 1,33 \cdot 10^4$ Па; $T = 293$ К; $a_m = 9,6 \cdot 10^{18}$ м⁻²; $f = 1$; $\tau_0 = 10^{-13}$ с получим $t_p = 3 \times 10^{-11}$ с, что говорит о том, что при высоких давлениях или температурах адсорбционное равновесие устанавливается практически мгновенно.

При низких давлениях или температурах адсорбционное равновесие устанавливается достаточно медленно. Так, для паров масла ($M = 422$ кг/кмоль) при $p = 1,3 \cdot 10^{-9}$ Па; $T = 298$ К; $Q_a = 96 \cdot 10^6$ Дж/кмоль; $a_m = 6,67 \cdot 10^{17}$ 1/м² получим $t_p \approx 10^5$ с, т. е. величину, соизмеримую с временем эксперимента (рис. 2.13).

Скорость сорбции q найдем, дифференцируя по времени (2.37):

$$q = a_m d\theta / dt = (B - \theta_0 A) a_m e^{-At}. \quad (2.40)$$

Если $B > \theta_0 A$, то наблюдается адсорбция, если $B < \theta_0 A$, то — десорбция.

Время, в течение которого скорость десорбции снижается при $\theta \leq 1$ до заданного значения, можно получить из (2.40):

$$t_d = \frac{0,43}{A} \lg \frac{(B - \theta_0 A) a_m}{q_d},$$

где q_d — скорость десорбции, равная заданному значению минимального газовыделения.

Это уравнение можно преобразовать к виду $\lg q_d = A_1 - B_1 t_d$, удобному для обработки экспериментальных данных.

Если время эксперимента меньше времени установления адсорбционного равновесия, то для расчета θ вместо (2.17) нужно пользоваться уравнением (2.37).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем различие между физической адсорбцией и хемосорбцией?
2. В связи с чем кривая потенциальной энергии взаимодействия молекулы с твердым телом имеет минимум?
3. Какой из эффектов взаимодействия является основным для полярных молекул?
4. Какова связь между давлением насыщенного пара раствора и концентрацией растворенного в нем вещества?
5. Чем отличаются угловые распределения молекул, испаряющихся из точечного и плоского источников?
6. Чем определяется время адсорбции газа на поверхности тела?
7. Почему при хемосорбции происходит образование только одного мономолекулярного слоя?
8. Каково соотношение между теплотой адсорбции и теплотой конденсации при полимолекулярной и островковой физических адсорбциях?
9. Чем определяется время достижения адсорбционного равновесия на поверхности твердого тела?
10. Как зависит растворимость газов в твердых телах от температуры и давления?

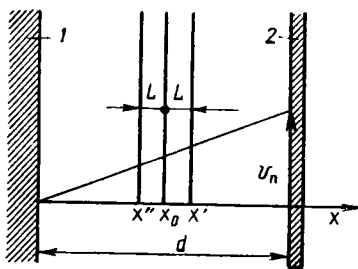
ГЛАВА 3

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМЕ

§ 3.1. Вязкость газов

При перемещении твердого тела со скоростью v_n за счет передачи количества движения молекулам газа возникает сила внутренне-го трения.

В области низкого вакуума весь газ между подвижной 2 и неподвижной 1 пластинами (рис. 3.1) можно разделить на слои толщиной L , где L — средняя длина свободного пути. Скорость движения каждого слоя различна и линейно зависит от расстояния между поверхностями переноса. В плоскости x_0 происходят столкновения молекул, вылетевших из плоскостей x' и x'' . Причиной возникновения силы вязкостного трения является то, что движущиеся как единое целое отдельные слои газа имеют разную скорость, вследствие чего происходит перенос количества движения из одного слоя в другой.



Р и с. 3.1. Расчетная схема для определения коэффициента вязкости в газах при низком вакууме

Изменение количества движения в результате одного столкновения равно $2mLdv_n/dx$. Принимая, что в среднем в отрицательном и положительном направлениях оси x в единицу времени единицу площади в плоскости x_0 пересекают согласно (1.13) $nv_{ap}/4$ молекул, получим общее изменение количества движения в единицу времени для плоскости x_0 :

$$\frac{mnLv_{ap} dv_n}{2 dx}.$$

Сила трения по всей поверхности переноса, согласно второму закону Ньютона, определяется общим изменением количества движения в единицу времени:

$$F_{тр} = -\frac{1}{2} nmLv_{ap} \frac{dv_n}{dx} A = -\eta \frac{dv_n}{dx} A, \quad (3.1)$$

где A — площадь поверхности переноса; η — коэффициент динамической вязкости газа:

$$\eta = \frac{mnv_{ap}L}{2} = \frac{\rho v_{ap}}{2} L. \quad (3.2)$$

Отношение η/ρ называют коэффициентом кинематической вязкости.

Более строгий вывод, в котором учтен закон распределения скоростей и длин свободного пути молекул, дает

$$\eta^* = 0,499\rho v_{ap}L, \quad (3.3)$$

что мало отличается от приближенного значения (3.2).

Если в (3.2) подставить значения зависящих от давления переменных n из (1.10) и L из (1.42), то

$$\eta = \frac{mv_{ap}}{2kT} L_1. \quad (3.4)$$

Согласно полученному выражению, коэффициент динамической вязкости при низком вакууме не зависит от давления.

Температурную зависимость коэффициента вязкости можно определить, если подставить в (3.2) v_{ap} и L соответственно из формул (1.18) и (1.41):

$$\eta = \frac{\sqrt{mkT}}{\pi^{3/2}d_m^2(1+C/T)}. \quad (3.5)$$

В соответствии с (3.5) η зависит от T^x , где x изменяется от $1/2$ при высоких температурах ($T \gg C$) до $3/2$ при низких температурах ($T \ll C$). Во всех случаях коэффициент динамической вязкости увеличивается при повышении температуры газа.

Значения коэффициентов динамической вязкости для некоторых газов при $T = 273$ К даны в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Коэффициенты динамической вязкости

Газы	H ₂	He	CH ₄	Ar	Ne	N ₂	CO	O ₂	CO ₂	Воз- дух
$\eta \cdot 10^5$ Н·с/м ²	0,88	1,90	1,10	2,10	3,00	1,75	1,70	2,02	1,40	1,70

Для двухкомпонентной смеси коэффициент динамической вязкости рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{\eta_1}{1 + \frac{\gamma d_{12}^2}{1 - \gamma d_{T1}^2} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{2m_2}}} + \frac{\eta_2}{1 + \frac{1 - \gamma}{\gamma} \frac{d_{12}^2}{d_{T2}^2} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{2m_1}}}, \quad (3.6)$$

где $\gamma = n_2 / (n_1 + n_2)$; $d_{12} = (d_{T1} + d_{T2}) / 2$; $\eta_1 = v_{ap1} m_1 / (3\pi d_{T1}^2 \sqrt{2})$; $\eta_2 = v_{ap2} m_2 / (3\pi d_{T2}^2 \sqrt{2})$; d_{T1} и d_{T2} находят из (1.40). Величина η в этом случае зависит от состава газовой смеси.

В области высокого вакуума молекулы газа перемещаются между движущейся поверхностью и неподвижной стенкой без соударения. В этом случае силу трения можно рассчитать по уравнению

$$F_{тр} = - \frac{m v_n n v_{ap} A}{4}. \quad (3.7)$$

Знак «—» в формуле (3.7) означает, что направление силы трения противоположно направлению переносной скорости v_n .

Сила трения в области высокого вакуума пропорциональна молекулярной концентрации или давлению газа. Уравнение (3.7) с учетом (1.18) можно преобразовать к следующему виду:

$$F_{тр} = - \frac{n v_n \sqrt{kmT}}{\sqrt{2}\pi} A, \quad (3.8)$$

откуда видно, что сила трения возрастает пропорционально корню квадратному из абсолютной температуры.

В области среднего вакуума можно записать аппроксимирующее выражение, рассчитывая градиент переносной скорости в промежутке между поверхностями переноса по следующей формуле:

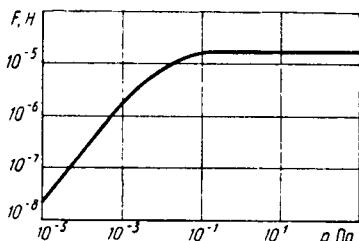


Рис. 3.2. Сила трения, возникающая при движении тонкой пластины в вакууме.

При $A=1 \text{ м}^2$, $T=273 \text{ К}$, $M=28 \text{ кг/кмоль}$, $v_n=1 \text{ м/с}$, $d=1 \text{ м}$

расстоянии между поверхностями переноса $d=1 \text{ м}$ показана на рис. 3.2.

Вязкость газов используется для измерения давлений в области среднего и высокого вакуума, однако вязкостные манометры не получили пока широкого применения из-за длительности регистрации давления. Гораздо шире явление вязкости газов используется в технологии получения вакуума. На этом принципе работают струйные эжекторные насосы, выпускаемые промышленностью для работы в области низкого вакуума.

§ 3.2. Перенос теплоты в вакууме

Теплопередача в разреженных газах может происходить за счет конвекции, теплопроводности и излучения.

При низком вакууме конвективный теплообмен играет важную роль. Перенос теплоты конвекцией от поверхности нити, нагретой до температуры T_n , к стенкам вакуумной камеры, имеющим температуру T , описывается уравнением

$$E_k = \alpha (T_n - T) A, \quad (3.10)$$

где α — коэффициент теплообмена; A — площадь поверхности нити. При свободной конвекции из-за силового воздействия гравитационного поля на газ, имеющий различную плотность вследствие температурных градиентов, коэффициент теплообмена

$$\alpha_c = a p^{2/3} (T_n - T), \quad (3.11)$$

где a — экспериментальный коэффициент, зависящий от материала и формы поверхности.

Коэффициент теплообмена в условиях вынужденной конвекции при поперечном обтекании нити для воздуха

$$\alpha_b = \text{Nu} \lambda / d, \quad (3.12)$$

$dv_n/dx = v_n/(d+2L)$, где d — расстояние между поверхностями переноса. Тогда с учетом (3.4) сила трения в области среднего вакуума

$$F_{\text{тр}} = - \frac{\eta v_n A}{d + 2L}. \quad (3.9)$$

Легко заметить, что в условиях низкого вакуума при $L \rightarrow 0$ формула (3.9) совпадает с (3.1), а в условиях высокого вакуума при $L \rightarrow \infty$ — с (3.8).

Зависимость от давления силы трения тонкой пластины площадью $A=1 \text{ м}^2$, движущейся в воздухе при $T=273 \text{ К}$ со скоростью $v_n=1 \text{ м/с}$, при

расстоянии между поверхностями переноса $d=1 \text{ м}$ показана на рис. 3.2.

Вязкость газов используется для измерения давлений в области среднего и высокого вакуума, однако вязкостные манометры не получили пока широкого применения из-за длительности регистрации давления. Гораздо шире явление вязкости газов используется в технологии получения вакуума. На этом принципе работают струйные эжекторные насосы, выпускаемые промышленностью для работы в области низкого вакуума.

§ 3.2. Перенос теплоты в вакууме

Теплопередача в разреженных газах может происходить за счет конвекции, теплопроводности и излучения.

При низком вакууме конвективный теплообмен играет важную роль. Перенос теплоты конвекцией от поверхности нити, нагретой до температуры T_n , к стенкам вакуумной камеры, имеющим температуру T , описывается уравнением

$$E_k = \alpha (T_n - T) A, \quad (3.10)$$

где α — коэффициент теплообмена; A — площадь поверхности нити. При свободной конвекции из-за силового воздействия гравитационного поля на газ, имеющий различную плотность вследствие температурных градиентов, коэффициент теплообмена

$$\alpha_c = a p^{2/3} (T_n - T), \quad (3.11)$$

где a — экспериментальный коэффициент, зависящий от материала и формы поверхности.

Коэффициент теплообмена в условиях вынужденной конвекции при поперечном обтекании нити для воздуха

$$\alpha_b = \text{Nu} \lambda / d, \quad (3.12)$$

где λ — коэффициент теплопроводности газа; d — характерный размер (диаметр нити); $Nu = k_1 Re^{k_2}$ — критерий Нуссельта; $Re = v_r d \rho / \eta$ — критерий Рейнольдса; v_r — скорость газового потока; k_1 и k_2 — константы, зависящие от числа Re : $k_1 = 0,45$; $k_2 = 0,5$ при $Re < 10^3$ и $k_1 = 0,245$; $k_2 = 0,6$ при $Re \geq 10^3$.

Теплопроводность газа в качестве явления переноса при низком вакууме можно рассматривать аналогично вязкости газа. Вместо количества движения в этом случае переносится энергия молекул газа. Количество теплоты, отнесенное к одной молекуле газа,

$$Q_1 = c_V m T, \quad (3.13)$$

где c_V — теплоемкость газа при постоянном объеме; m — масса молекулы газа; T — абсолютная температура.

Если концентрация газа n постоянна, то аналогично (3.1) можно записать выражение для теплового потока:

$$E_\tau = -\frac{1}{2} n m L c_V v_{ap} \frac{dT}{dx} A = -\lambda_n \frac{dT}{dx} A, \quad (3.14)$$

где λ_n — коэффициент теплопроводности газа при низком вакууме:

$$\lambda_n = n m v_{ap} L c_V / 2 = \eta c_V. \quad (3.15)$$

Таким образом, коэффициент теплопроводности газа равен произведению коэффициента динамической вязкости на удельную теплоемкость газа при постоянном объеме. Для расчета c_V можно использовать выражение

$$c_V = \frac{k}{(\gamma - 1) m}, \quad (3.16)$$

где $\gamma = c_p / c_V$ — отношение теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме (для одноатомных газов $\gamma = 1,66$; для двухатомных $\gamma = 1,4$; для трехатомных $\gamma = 1,3$); k — постоянная Больцмана; m — масса молекулы газа.

Молекулярно-кинетическая теория, используя функции распределения скоростей и длин свободного пути молекул газа, дает для коэффициента теплопроводности более точное выражение

$$\lambda_n^* = (9\gamma - 5) \eta c_V / 4, \quad (3.17)$$

отличающееся не более чем на 20% от значения, даваемого выражением (3.15).

Характер зависимости коэффициента теплопроводности и коэффициента динамической вязкости газа при низком вакууме от температуры и давления идентичен.

Теплопередачу излучением в низком вакууме можно определить по закону Стефана — Больцмана:

$$E_u = 5,7 E_e \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] E_r, \quad (3.18)$$

где E_n — плотность теплового потока, Вт/м²; T_1, T_2 — температуры на внешней и внутренней поверхности переноса; E_r — геометрический фактор (для параллельных плоскостей и концентричных цилиндрических оболочек $E_r=1$); E_e — приведенная степень черноты:

$$E_e = \frac{1}{1/e_2 + (A_2/A_1) [(1/e_1) - 1]}, \quad (3.19)$$

где A_1 и A_2 — площади внешней и внутренней поверхностей переноса; e_1 и e_2 — коэффициенты излучения внешней и внутренней поверхностей.

Для гладких поверхностей в случае нержавеющей стали $e=0,1$ при $T=300$ К и $0,06$ при $T=77$ К, а для меди соответственно $e=0,03$ и $0,019$.

При установке экранов приведенная степень черноты уменьшается пропорционально количеству установленных экранов N . Если $A_1=A_2$; $e_1=e_2=e$, то приведенная степень черноты

$$E_N = \frac{E_e}{N+1} = \frac{e}{(2-e)(N+1)}. \quad (3.20)$$

В высоком вакууме конвективным теплообменом для технических расчетов обычно пренебрегают, считая его малым по сравнению с другими способами теплопередачи. Теплопроводность газа в высоком вакууме между двумя поверхностями с температурой T_2 и T_1 , используя (1.13), можно записать в виде

$$E_T = -\frac{nv_{ap}}{4} c_V m (T_2 - T_1) A. \quad (3.21)$$

Преобразовав (3.21) с учетом уравнения газового состояния (1.10) и выражения для c_V (3.16), получим

$$E_T = -\lambda'_b (dT/dx) A, \quad (3.22)$$

где λ'_b — коэффициент теплопроводности газа при высоком вакууме:

$$\lambda'_b = \frac{v_{ap}}{4T(\gamma-1)} pd, \quad (3.23)$$

т. е. коэффициент теплопроводности при высоком вакууме пропорционален давлению.

Более точное выражение, полученное в молекулярно-кинетической теории,

$$\lambda_b^* = \frac{(\gamma+1)v_{ap}}{8T(\gamma-1)} pd, \quad (3.24)$$

отличается от (3.23) для двухатомных газов на 20%.

Если при соударении молекулы газа с поверхностью не происходит полного обмена энергией, т. е. коэффициент аккомодации по-

верхней переноса меньше единицы, то уменьшение теплового потока в (3.22) учитывается множителем $\alpha/(2-\alpha)$, где α — коэффициент аккомодации для обеих поверхностей переноса.

Таким образом, окончательное выражение для коэффициента теплопроводности газа в высоком вакууме можно записать в виде

$$\lambda_B = \frac{\alpha}{2-\alpha} \lambda_n^* = \frac{\alpha(\gamma+1)v_{ap}d}{8T(\gamma-1)} p = \frac{\alpha}{2-\alpha} K_T p. \quad (3.25)$$

Теплопередачу излучением в высоком вакууме можно рассчитать по формулам (3.18)...(3.20).

В области среднего вакуума конвективный теплообмен рассчитывают по формулам (3.10) ... (3.12), а коэффициент теплопроводности газа может быть приближенно определен по выражению

$$\lambda = \frac{\lambda_n^* d}{d + g_1 + g_2} = \frac{(9\gamma - 5) \eta c_V d}{4(d + g_1 + g_2)}, \quad (3.26)$$

где

$$g_1 = \frac{(2 - \alpha_1)(9\gamma - 5)}{2\alpha_1(\gamma + 1)} L; \quad g_2 = \frac{(2 - \alpha_2)(9\gamma - 5)}{2\alpha_2(\gamma + 1)} L.$$

Здесь α_1, α_2 — коэффициенты аккомодации поверхностей переноса; L — длина свободного пути при средней температуре.

Для приближенных расчетов можно принять, что $g_1 \approx g_2 \approx L$. Значения α для различных газов и материалов подложки приведены в табл. 3.2, а коэффициенты теплопроводности — в табл. 3.3.

Таблица 3.2

Коэффициенты аккомодации при 300 К

Газы	W	Pt	Ni	SiO ₂	Газы	W	Pt	Ni	SiO ₂
He	0,40	0,5	0,4	0,38	N ₂	0,87	0,8	0,8	0,8
H ₂	0,35	0,25	0,3	0,37	O ₂	0,85	0,83	0,85	0,8
Ag	0,85	0,89	0,95	0,9	Воздух	0,87	0,9	0,8	0,8
Ne	0,78	0,7	0,8	0,7	CO ₂	0,85	0,8	0,8	0,8

Учитывая, что $L = L_1/p$, преобразуем (3.26) и получим

$$\lambda = A p / (B + p), \quad (3.27)$$

где $A = (9\gamma - 5) \eta c_V / 4$;

$$B = \frac{(9\gamma - 5) [(2 - \alpha_1) \alpha_2 + (2 - \alpha_2) \alpha_1] L_1}{2(\gamma + 1) d \alpha_1 \alpha_2}.$$

Уравнение (3.27) справедливо в широком диапазоне давлений. При $p \gg B$ оно переходит в (3.17), а при $p \rightarrow 0$ — в (3.25). На рис. 3.3

Коэффициенты теплопроводности

Газы	c_p , кДж/(кг·К)	C_V , кДж/(кг·К)	$\lambda_n \cdot 10^2$ Вт/(м·К)	$q_r = K_{ТВ}/K_{ТГ}$
N ₂	1,03	0,73	2,4	1,06
O ₂	0,92	0,66	2,4	1,06
CO ₂	0,85	0,66	1,45	0,98
Ar	0,52	0,31	1,6	1,8
H ₂ O	1,95	1,47	1,6	0,63
He	5,36	3,13	14,2	0,57
Ne	1,05	0,68	4,65	1,27
H ₂	13,8	10,2	16,8	0,274
Воздух	1,01	0,72	2,4	1,00

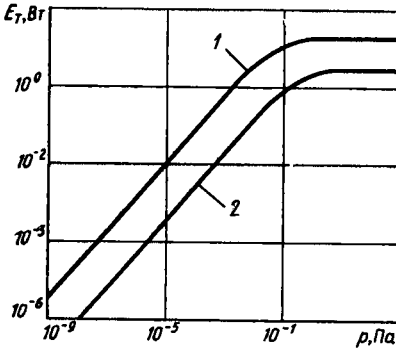


Рис. 3.3. Зависимость от давления теплового потока через разреженный газ

При $A=1$ м², $d=1$ м, $\Delta T=100$ К по формуле (3.27) для: 1 — водорода, 2 — воздуха

Учитывая, что масса и диаметр электрона значительно меньше, чем у молекулы газа, формулу (1.44) можно упростить:

$$L_s = \frac{1}{\pi n_2 d_{T2}^2 / 4}, \quad (3.28)$$

здесь n_2 — концентрация молекул газа; d_{T2} — эффективный диаметр молекулы газа; L_s — средняя длина свободного пути электронов.

Сравнивая (3.28) с формулой для определения средней длины свободного пути молекул газа (1.38), можно заметить, что длина свободного пути электронов не зависит от их концентрации, а при одной и той же концентрации молекул газа длина свободного пути

показаны зависимости теплового потока в различных газах от давления.

§ 3.3. Электрические явления в вакууме

Прохождение электрического тока через газы при приложении разности потенциалов связано с перемещением электронов и положительных ионов. При отсутствии электрического поля энергетическое распределение электронов, ионов и нейтральных молекул одинаково.

Среднюю длину свободного пути электронов в вакууме можно вычислить, так же как и для молекул, по формуле (1.44).

электронов в 5,6 раза больше, чем у молекул газа или положительных ионов.

Ионизация молекул остаточных газов с образованием свободных электронов и положительных ионов возможна при воздействии на молекулу α -, β - или γ -излучения с энергией, превышающей энергию ионизации соответствующих газов (табл. 3.4).

Наиболее часто для ионизации остаточных газов используется электронная бомбардировка. Процесс ионизации остаточных газов характеризует эффективность ионизации молекул ϵ , т. е. число пар ионов, образованных одним электроном на пути в 1 м при давлении 1 Па. Зависимость ϵ от ускоряющего напряжения (рис. 3.4) имеет характерный максимум, соответствующий энергиям электронов 100...150 эВ. Молекулы с большим атомным числом имеют более высокие значения эффективности ионизации.

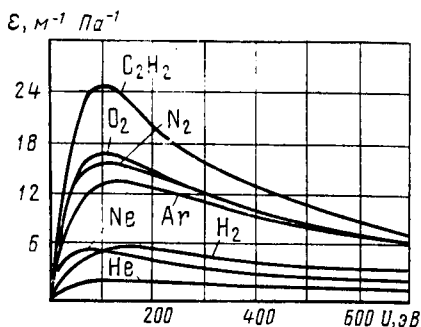


Рис. 3.4. Зависимость эффективности ионизации молекул газов электронной бомбардировкой от ускоряющего напряжения

Таблица 3.4

Энергия ионизации

	N ₂	He	Ne	Ar	CO	O ₂	H ₂
Энергия ионизации, эВ	14,5	24,6	21,6	15,8	14,1	12,6	13,6

Под действием разности потенциалов U_s ионы и электроны дополнительно к тепловой энергии $3kT/2$ получают энергию qU_s , где q — элементарный заряд. Температура среды, сообщающая частицам энергию, равную энергии движения заряженных частиц, под воздействием электрического поля $T = 2qU_s / (3k)$.

Можно подсчитать, что электроны, ускоренные разностью потенциалов 1 В, имеют такую же энергию, как при температуре 7800 К без электрического поля.

Электропроводность газового промежутка при самостоятельном разряде (без дополнительных ионизирующих излучений) зависит от давления. Газ всегда содержит свободные электроны, появляющиеся, например, при взаимодействии с космическим излучением. При низком вакууме в связи с малой длиной свободного пути эти электроны под воздействием электрического поля не успевают приобрести энергию, необходимую для ионизации молекул газа. Электропроводность газа в таких условиях мала.

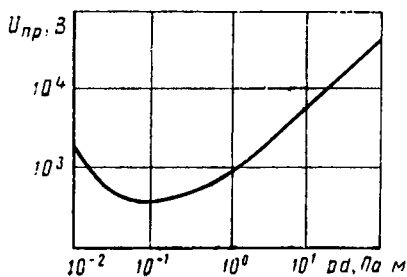


Рис. 3.5. Зависимость пробивного напряжения от произведения давления газа на расстояние между электродами

При высоком вакууме в связи с малым количеством заряженных частиц электропроводность газового промежутка еще меньше.

В области среднего вакуума наблюдаются наибольшие значения электропроводности газа. В этих условиях свободные электроны осуществляют ионизацию молекул остаточных газов, а образующиеся при этом вторичные электроны поддерживают самостоятельный разряд.

Электросопротивление газового промежутка может характеризоваться пробивным напряжением $U_{пр}$, которое зависит от природы газа, расстояния между электродами и давления. Пробивное напряжение зависит от произведения давления газа на расстояние между электродами, а не от каждого из этих параметров в отдельности. Зависимость пробивного напряжения от произведения pd , где d — расстояние между электродами, показано на рис. 3.5 и имеет характерный минимум в области среднего вакуума. Эта зависимость известна под названием кривой Па ш е н а.

Прохождение электрического тока через разреженные газы в области среднего вакуума сопровождается свечением газа, зависящим от рода газа и давления. Это явление используется для качественного определения давления и состава газа. При давлениях порядка 10^3 Па разряд появляется между электродами в виде тонкого шнура, который при давлениях около 10^2 Па заполняет всю разрядную трубку. При этом в разряде от катода к аноду можно выделить несколько характерных областей: катодное темное пространство (Астона); светящийся слой, создающий катодное свечение; темное пространство (Крукса); зона отрицательного свечения; темная зона (Фарадея); положительный столб; анодное темное пространство.

Положительный столб имеет интенсивное свечение, по цвету которого можно судить о роде газа, заполняющего разрядный промежуток; воздух светится голубым цветом, кислород — желтым, азот — оранжевым, гелий — розовым, пары воды — голубовато-белым, аргон — фиолетовым, неон — красным.

§ 3.4. Диффузия в газах

В низком вакууме уравнение стационарной диффузии молекул газа имеет следующий вид:

$$P_{II} = -D(dn/dx), \quad (3.29)$$

где D — коэффициент диффузии; dn/dx — градиент концентрации; P_n — плотность потока частиц в направлении, противоположном градиенту концентрации.

Рассмотрим однородный газ, состоящий из молекул одного типа. В условиях низкого вакуума через плоскость, перпендикулярную направлению потока частиц с обеих сторон из слоев, удаленных на расстояние, равное средней длине свободного пути, согласно (1.13), проходят два встречных потока, разность которых и определяет скорость диффузии:

$$P_n = \frac{v_{ap}}{4} (n' - n'') = -\frac{v_{ap}}{4} 2L \frac{dn}{dx}, \quad (3.30)$$

где n' и n'' — концентрации газа в слоях, удаленных от рассматриваемой плоскости на L . Сравнивая (3.29) и (3.30), получим выражение для коэффициента самодиффузии в низком вакууме:

$$D_c = Lv_{ap}/2. \quad (3.31)$$

Воспользовавшись формулами (1.10), (1.18) и (1.39), имеем

$$D_c = \frac{k^{3/2} T^{5/2}}{\pi^{3/2} m^{1/2} p d_m^2 (T + C)}.$$

Таким образом, коэффициент самодиффузии в области низкого вакуума обратно пропорционален давлению. Температурная зависимость коэффициента самодиффузии определяется множителем $T^{5/2} (T + C)$, который можно записать в виде T^x , где x изменяется от 1,5 при $T \gg C$ до 2,5 при $T \ll C$, т. е. коэффициент самодиффузии увеличивается с повышением температуры газа. Точное значение D_c , рассчитанное в соответствии с молекулярно-кинетической теорией, практически совпадает с результатами расчетов по формуле (3.31).

Для смеси двух газов с концентрациями n_1 и n_2 в связи с тем, что $n = n_1 + n_2 = \text{const}$, можно записать

$$\frac{\partial n_1}{\partial x} + \frac{\partial n_2}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial n_1}{\partial t} + \frac{\partial n_2}{\partial t} = 0$$

откуда следует равенство коэффициентов диффузии первого газа во втором D_{12} и второго в первом D_{21} : $D_{12} = D_{21} = D_a$.

Коэффициент взаимной диффузии D_a двух газов при низком вакууме рассчитывается по формуле

$$D_a = \frac{8\sqrt{2}}{3} \left(\frac{kT}{\pi} \right)^{3/2} \frac{1}{p(d_1 + d_2)^2} \sqrt{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}}.$$

Здесь d_1 и d_2 — эффективные диаметры молекул газа с массой m_1 и m_2 , определяемые по формуле (1.40). Коэффициент взаимной диффузии D_a не зависит от процентного состава смеси и обратно пропорционален общему давлению.

Удобно представить выражение для D_v в виде $D_v = D_0(T/T_0)^x (\rho_0/\rho)$, где $x = 1,5 \dots 2,5$; $T_0 = 273$ К; $\rho_0 = 10^5$ Па.

Коэффициенты D_0 для смеси воздуха с различными газами имеют значения, приведенные в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Коэффициенты взаимодиффузии воздуха с различными газами

Коэффициент	O ₂	CO ₂	CH ₄	H ₂ O	H ₂	C ₂ H ₂
D_0 , см ² /с	0,178	0,138	0,196	0,220	0,661	0,194

В области высокого вакуума расстояние между поверхностями переноса всегда меньше, чем средняя длина свободного пути молекул газа, и, таким образом, молекулы, вылетевшие с одной из поверхностей, достигают другую без соударений. В этом случае при разности концентраций ($n_1 - n_2$) в объеме вакуумной камеры согласно (1.13) и (1.18) скорость диффузии

$$P_n = \frac{v_{ap} d}{4} \frac{n_1 - n_2}{d} = \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} (n_1 - n_2). \quad (3.32)$$

Скорость самодиффузии в высоком вакууме прямо пропорциональна \sqrt{T} и обратно пропорциональна \sqrt{m} . Если два газа, имеющих малую концентрацию, диффундируют в третий, то при постоянной температуре

$$P_{n1}/P_{n2} = v_{ap1}/v_{ap2} = \sqrt{M_2/M_1}. \quad (3.33)$$

Это соотношение используют при изучении работы диффузионных вакуумных насосов.

В области среднего вакуума скорость диффузии можно рассчитать по приближенному уравнению

$$P_n = \frac{v_{ap} L d}{2(d + 2L)} \frac{n_1 - n_2}{d} = D_c \frac{n_1 - n_2}{d}, \quad (3.34)$$

где d — расстояние между поверхностями переноса; D_c — коэффициент самодиффузии; $D_c = v_{ap} d L / (2d + 4L)$. Это уравнение справедливо для низкого и высокого вакуума. При низком вакууме $L \rightarrow 0$ и (3.34) совпадает с (3.30), так как $dn/dx = (n_1 - n_2)/d$. В области высокого вакуума $L \gg d$ и (3.34) переходит в (3.32). Зависимость коэффициента самодиффузии от давления для различных газов в широком диапазоне давлений, рассчитанная при $T = 293$ К по уравнению (3.34), показана на рис. 3.6.

В связанных между собой сосудах, имеющих различную температуру, в зависимости от степени вакуума устанавливается различное соотношение давлений и молекулярных концентраций.

При низком вакууме условием отсутствия газовых потоков в двух соединенных между собой объемах, имеющих разную температуру, является равенство давлений в этих объемах: $p_1 = p_2$. При этом, согласно уравнению газового состояния, соотношение концентраций $n_1/n_2 = T_2/T_1$.

В высоком вакууме может устанавливаться только динамическое равновесие, при котором потоки газа, переходящие из одного сосуда в другой, равны. Для сосудов, соединенных отверстием, согласно выражениям для числа молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени (1.13), и среднеарифметической скорости молекул газа (1.18), можно записать условие равновесия в виде

$$A \frac{n_1}{4} \sqrt{\frac{8kT_1}{\pi m}} = A \frac{n_2}{4} \sqrt{\frac{8kT_2}{\pi m}},$$

где A — площадь отверстия. После упрощения получим

$$p_1/p_2 = \sqrt{T_1/T_2} \text{ и } n_1/n_2 = \sqrt{T_2/T_1}.$$

Это справедливо и для сосудов, соединенных трубопроводами. Таким образом, в высоком вакууме равновесие в соединенных объемах устанавливается при давлениях, пропорциональных корню квадратному из отношения их абсолютных температур.

В области среднего вакуума для определения соотношения между давлениями можно пользоваться приближенной формулой

$$p_1/p_2 = (T_1/T_2)^{\frac{2L}{2(d+2L)}}, \quad (3.35)$$

где d — эффективный размер соединительного отверстия или трубопровода; L — средняя длина свободного пути молекул газа при среднем давлении. Относительная ошибка формулы не превышает 10%.

Формула (3.35) справедлива как в областях низкого (при $L \rightarrow 0$, $p_1 = p_2$), так и высокого вакуума (при $L \rightarrow \infty$, $p_1/p_2 = \sqrt{T_1/T_2}$).

Приведенные соотношения важны при измерении давления в соединенных вакуумных камерах, имеющих различную температуру.

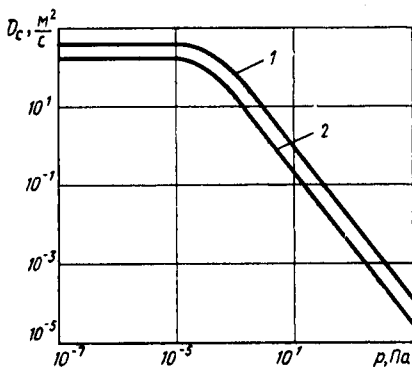


Рис. 3.6. Зависимость коэффициента самодиффузии различных газов при $T=293$ К от давления:
1 — водород, 2 — воздух

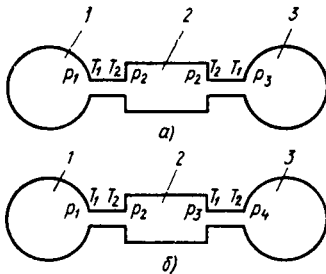


Рис. 3.7. Схемы соединения объектов, имеющих различную температуру

Пусть манометрический преобразователь установлен на участке вакуумной системы с температурой $T_1=293$ К, а давление измеряют в объеме, охлажденном до температуры жидкого азота $T_2=77$ К (такие условия имеют место в вакуумных системах с азотными ловушками и адсорбционными насосами). Тогда в условиях высокого вакуума, согласно (3.35), $p_2=p_1/2$. При измерении же давления в вакуумной печати манометрическим преобразователем, установленным на участке вакуумной системы, имеющей комнатную температуру $T_1=293$ К и $T_2=1273$ К, $p_2 \approx 2p_1$.

Если между баллонами 1 и 3 (рис. 3.7, а), находящимися в одинаковых температурных условиях, установить баллон 2, имеющий другую температуру, то, применяя последовательно уравнение (3.35), можно убедиться, что наличие баллона 2 не влияет на давления p_1 и p_3 в баллонах 1 и 3.

При высоком вакууме (рис. 3.7, б) отношение давлений не зависит от числа соединяемых баллонов $p_1/p_4 = \sqrt{T_1/T_2}$. Если же в баллоне 2 создать условия низкого вакуума, например, увеличив его размеры, то p_2 станет равным p_3 , а отношение давлений увеличится: $p_1/p_4 = T_1/T_2$. Этот эффект используется для создания тепловых вакуумных насосов.

§ 3.5. Режимы течения газов

Уравнение стационарной диффузии газа в элементе вакуумной системы в соответствии с уравнением (3.29) и с учетом массы молекулы газа m , площади проходного сечения элемента A и длины элемента l можно записать в следующем виде:

$$P = P_n A = D_s m \frac{n_1 - n_2}{e} A, \quad (3.36)$$

где P — поток газа через трубу, измеряемый массой газа, проходящего через элемент в единицу времени, кг/с; n_1, n_2 — концентрации молекул газа на концах элемента; D_s — коэффициент диффузии газа в элементе, отличающийся от D в формуле (3.35) из-за влияния стенок элемента.

Воспользовавшись уравнением газового состояния (1.10), преобразуем (3.36):

$$P = \frac{D_s m}{kT} \frac{p_1 - p_2}{l} A. \quad (3.37)$$

В соответствии с уравнением газового состояния в форме (1.12) масса газа Nm при постоянной температуре прямо пропорциональна произведению давления газа на его объем. Это позволяет ввести

внесистемную условную единицу количества газа — $1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}$, которая равна количеству газа, заключенному в объеме 1 м^3 при давлении 1 Па и температуре $T=273 \text{ К}$. Для газа с молекулярной массой M пересчет этой единицы в килограммы можно сделать согласно соотношению $1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} = 1,3 \cdot 10^{-5} M/M_v$ (кг), где M_v — молекулярная масса воздуха ($M_v=29 \text{ кг/кмоль}$). Условная единица газового потока $1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ часто применяется в вакуумных расчетах.

Если выразить газовый поток не в кг/с, а в условных единицах потока газа, то, согласно (1.12) и (3.37),

$$Q = \frac{P_k T_0}{m} = \frac{D_s A T_0}{l T} (p_1 - p_2) = U (p_1 - p_2), \quad (3.38)$$

где Q — газовый поток, $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; U — проводимость элемента вакуумной системы, $\text{м}^3/\text{с}$;

$$U = D_s A T_0 / (l T); \quad (3.39)$$

T — температура газа, К; $T_0=273 \text{ К}$.

Проводимость элемента является коэффициентом пропорциональности между потоком и разностью давлений и численно равна количеству газа, протекающему через элемент в единицу времени, при разности давлений на концах элемента, равной единице. Для приближенных расчетов газовых потоков при комнатной температуре обычно принимают $T_0/T=1$.

Сопrotивление элемента — это величина, обратная его проводимости:

$$Z = 1/U. \quad (3.40)$$

По аналогии с электрическими цепями, в вакуумной технике при приближенном рассмотрении процессов течения газа принимается, что проводимость элемента не зависит от его расположения среди других элементов. Тогда для i параллельно соединенных элементов с проводимостями U_i можно определить общую проводимость:

$$U_0 = \sum_{i=1}^N U_i, \quad (3.41)$$

где N — общее число элементов.

Для i последовательно соединенных элементов получим общую проводимость

$$U_0 = \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{U_i} \right)^{-1}. \quad (3.42)$$

Проводимость элемента вакуумной системы зависит от степени вакуума, при котором происходит течение газа. В низком вакууме проводимость растет при повышении давления, в высоком она остается постоянной.

В низком вакууме при высоких давлениях возможно существование инерционного режима течения газа, аналогичного турбулентному режиму, рассматриваемому в гидродинамике. При этом силы инерции движущейся массы газа, вызывающие образование вихрей, приводят к сложному характеру распределения скорости движения газа по поперечному сечению элемента.

Для определения условия существования инерционного режима течения можно воспользоваться критерием Рейнольдса $Re = dv_r/\nu$. Здесь d — характерный размер элемента; v_r — скорость течения газа; ν — коэффициент кинематической вязкости. При $Re > 2200$ возникает инерционный режим течения газа.

При течении газов в трубопроводах условие существования инерционного режима можно записать в другой форме, выражая v_r через поток газа Q : $v_r = 4Q/(\pi d^2 \rho)$. Для воздуха при комнатной температуре условие $Re > 2200$ можно переписать в виде $Q > 3 \cdot 10^3 d$, где Q — поток газа, $\text{м}^3/\text{Па}\cdot\text{с}$; d — диаметр трубопровода, м.

В элементах вакуумных систем такие потоки существуют очень редко. В основном они встречаются в момент запуска некоторых вакуумных установок. Поэтому в дальнейшем этот режим течения газа рассматривать не будем, считая его нехарактерным для вакуумных систем. В низком вакууме основную роль играет вязкостный режим течения газа, при котором характер распределения скорости в поперечном сечении определяется силами внутреннего трения.

При высоком вакууме силы внутреннего трения в газах стремятся к нулю и существует режим течения газа, для которого характерно независимое перемещение отдельных молекул. Такой режим течения называется молекулярным.

В среднем вакууме на течение газа одновременно оказывают влияние внутреннее трение и молекулярный перенос. Существующий при этом переходный режим течения называют молекулярно-вязкостным.

Граничные условия существования различных режимов течения газа в вакуумных системах в зависимости от критерия Кнудсена K_n — отношения средней длины свободного пути молекул газа L к эффективному размеру $d_{эф}$ — представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6
Режимы течения газа в вакуумных системах

Режимы	Границы	
	верхняя	нижняя
Вязкостный	Атмосферное давление $K_n > 5 \cdot 10^{-3}$	$K_n \leq 5 \cdot 10^{-3}$ $K_n \leq 1,5$
Молекулярно-вязкостный		
Молекулярный	$K_n > 1,5$	$K_n \rightarrow \infty$

В каждом режиме для любого из элементов вакуумных систем существует своя зависимость проводимости от давления, температуры и характерных размеров элемента.

Далее в качестве примера рассмотрим эти зависимости для двух типов элементов вакуумных систем: отверстий и трубопроводов.

§ 3.6. Расчет характеристик течения газа методами механики сплошной среды

При низком вакууме, когда длина свободного пути молекул газа очень мала, газ можно считать сплошной средой, движение которой определяется силами инерции или внутреннего трения. При высоком вакууме, хотя газ перестает быть сплошной средой, методы механики сплошной среды остаются удобным математическим аппаратом для аппроксимации основных закономерностей течения газа.

Для описания течения газа запишем два дифференциальных уравнения: баланса массы и баланса сил. Уравнение баланса массы $dQ/dx=f(x, p)$ при $f(x, p)=0$ превращается в уравнение сплошности потока. Поток при этом остается неизменным во всех сечениях вакуумной системы, а источник газовой выделенности находится в откачиваемом объекте, что характерно для вакуумных систем с сосредоточенными параметрами (рис. 3.8, а).

Если $dQ/dx=f(x)$ зависит только от x , то источники газовой выделенности распределены по длине вакуумной системы. Такими источниками могут быть специально установленные натекатели, течи через неплотности соединений, газопроницаемость и газовой выделение материалов (рис. 3.8, б).

В тех случаях, когда $\frac{dQ}{dx}=f(p)$ зависит от давления, в вакуумной системе обычно имеются сорбирующие стенки (рис. 3.8, в).

Уравнение баланса сил записывают из условия, что перепад давления dp является источником движущей силы, равной при низком вакууме силе сопротивления, возникающей за счет внутреннего трения между слоями движущегося газа, или при высоком вакууме — силе внешнего трения газа о стенки элемента вакуумной системы: $dp/dx=\varphi(x, p, Q)$.

Если $dp/dx=\text{const}$, то имеем дело с течением газа в трубопроводе постоянного поперечного сечения при молекулярном режиме. При $dp/dx=f(x, Q)$ трубопровод имеет переменное поперечное се-

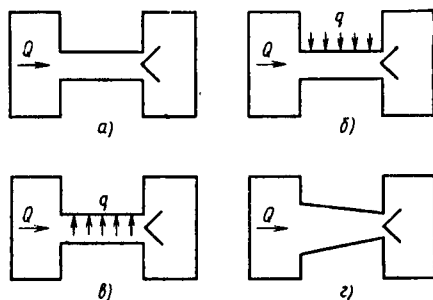


Рис. 3.8. Расчетные схемы вакуумных трубопроводов

чение (рис. 3.8, *з*), а в случае зависимости $\frac{dp}{dx} = f(p, Q)$ — режим течения вязкостный или молекулярно-вязкостный.

Уравнения баланса массы и баланса сил путем исключения Q могут быть переписаны в виде одного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка: $d^2p/dx^2 = \psi(x, p)$. Граничные условия могут быть заданы в виде постоянных давлений на концах или потока и давления на одном из концов трубопровода. Решение в виде функции распределения $p(x)$ получают в результате интегрирования записанного уравнения.

§ 3.7. Течение газов через отверстия

Под отверстием будем понимать трубопровод, длина которого значительно меньше диаметра ($l \leq 0,01d$). Пусть отверстие расположено в стенке, разделяющей два бесконечно больших объема (рис. 3.9, *а*).

При низком вакууме и вязкостном режиме течения газа закон сохранения энергии для адиабатического истечения газа можно записать в виде равенства приращения кинетической энергии газа и изменения его энтальпии:

$$G\omega_{r2}^2/2 = G(I_1 - I_2), \quad (3.43)$$

где G — поток газа; ω_{r2} — скорость газа на выходе из отверстия; I_1 и I_2 — энтальпии газа до и после прохождения отверстия. Воспользовавшись тем, что $I = c_p T$, перепишем уравнение (3.43) в следующем виде:

$$\omega_{r2}^2/2 = c_p T_1 (1 - T_2/T_1). \quad (3.44)$$

Вводя удельный объем газа v , выражаемый в m^3/kg , запишем уравнение газового состояния (1.12) в виде $pv = RT/M$. Из технической термодинамики известно, что для адиабатического процесса

$$v_1/v_2 = (p_2/p_1)^{1/\gamma}, \quad \gamma = c_p/c_v, \quad c_p - c_v = R/M.$$

Преобразуем уравнение сохранения энергии (3.44) к виду

$$\omega_{r2} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]}. \quad (3.45)$$

Поток газа через отверстие (кг/с) с учетом записанного для ω_{r2} выражения (3.45)

$$P = \omega_{r2} A / v_2 = \psi A \sqrt{p_1 / v_1}, \quad (3.46)$$

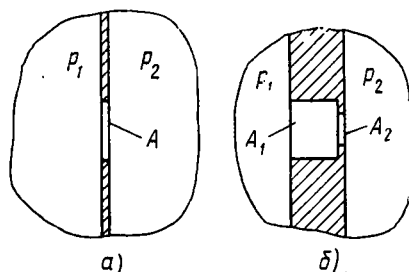


Рис. 3.9. Формы отверстий:
а — соединение бесконечных объемов; *б* — соединение бесконечного и ограниченного объемов

где

$$\psi = r^{1/\gamma} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} [1 - r^{(\gamma-1)/\gamma}]}, \quad r = p_2/p_1;$$

A — площадь отверстия.

Из уравнения газового состояния следует, что $v_1 = RT_1/(Mp_1)$. Тогда (3.46) можно переписать в виде

$$P = \psi A p_1 \sqrt{M/(RT_1)}. \quad (3.47)$$

В условных единицах массы газовой поток

$$Q = \frac{PRT_1}{M} = \psi A p_1 \sqrt{\frac{RT_1}{M}}. \quad (3.48)$$

Уменьшение отношения давлений $r = p_2/p_1 \leq 1$ приводит к тому, что количество газа, протекающего через диафрагму, и конечная скорость потока в области p_2 увеличиваются до тех пор, пока отношение p_2/p_1 не достигнет критического значения, соответствующего скорости звука. Если процесс истечения адиабатический, то критическое значение

$$r_k = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}; \quad (3.49)$$

Для двухатомных газов и воздуха ($\gamma=1,4$) $r_k=0,528$, для одноатомных газов ($\gamma=1,67$) $r_k=0,437$, для трехатомных газов ($\gamma=1,3$) $r_k=0,546$.

При отношениях давлений $p_2/p_1 < r_k$ количество перетекающего газа остается неизменным. В области отношений $p_2/p_1 > r_k$ проводимость отверстия, согласно (3.38) и уравнению (3.48), определяется выражением

$$U_{об} = \frac{Q}{p_1 - p_2} = \psi \frac{A}{1-r} \sqrt{\frac{RT_1}{M}}. \quad (3.50)$$

Для воздуха и других двухатомных газов при $\gamma=1,4$ из (3.46) получим

$$\psi = 2,65 r^{0,714} (1 - r^{0,236})^{1/2}; \quad (3.51)$$

$$U_{об} = \frac{91A\psi}{1-r} \sqrt{\frac{T_1}{M}}, \quad (3.52)$$

где M — молекулярная масса, кг/кмоль; T_1 — абсолютная температура, К; A — площадь отверстия, м²; r — отношение давлений p_2/p_1 ; ψ — функция от r , рассчитанная согласно (3.51) и показанная на рис. 3.10.

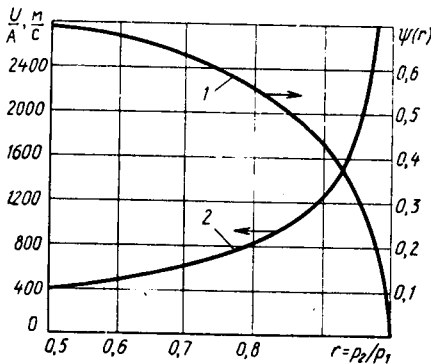


Рис. 3.10. График функции $\psi(r)$ для воздуха при $\gamma=1,4$ (1). Проводимость единицы площади отверстия при вязкостном режиме для воздуха при $T=293$ К в зависимости от отношения давлений $r = p_2/p_1$ (2)

При комнатной температуре ($T=293$ К) для воздуха ($M=29$ кг/кмоль) уравнение (3.52) можно упростить:

$$U_{\text{ов}} = \frac{289\psi A}{1-r} \quad \text{при } 1 > r \geq 0,528. \quad (3.53)$$

В закритическом режиме течения, когда $r < 0,528$, величина $\psi = \psi(0,528) = 0,69$. Тогда проводимость отверстия

$$U_{\text{ов}} = \frac{200A}{1-r} \quad \text{при } 0,528 > r \geq 0,1. \quad (3.54)$$

При больших перепадах давления, когда $r < 0,1$, получим

$$U_{\text{ов}} = 200 A \quad \text{для } 0,1 > r \geq 0. \quad (3.55)$$

Обычно при расчете проводимости отношение давлений r заранее не известно. Расчет ведется методом последовательных приближений. Для первого приближения всегда можно принять, что проводимость равна минимальному значению $U_{\text{ов}} = 200 A \text{ м}^3/\text{с}$ и не зависит от r . Для круглых отверстий это значение $U_{\text{ов}} = 160 d^2 \text{ м}^3/\text{с}$.

В обычных вакуумных системах, проектируемых для работы в стационарном режиме, отношение давлений r всегда больше коэффициента использования насоса. При оптимальных значениях коэффициентов использования насосов отношение давления r лежит в пределах 0,8...0,9, что позволяет принимать в качестве первого приближения $U_{\text{ов}} = 1000 A \text{ м}^3/\text{с}$. Для круглых отверстий $U_{\text{ов}} = 785 d^2 \text{ м}^3/\text{с}$. Проводимость отверстия при высоком вакууме в молекулярном режиме рассчитывают, согласно (3.38), в виде

$$U_{\text{ом}} = \frac{Q}{p_1 - p_2} = \frac{PkT}{m(p_1 - p_2)},$$

где $P = P_1 - P_2$; P_1 и P_2 — массовые потоки через отверстие, проходящие навстречу друг другу. С учетом того, что $P_1 = n_1 m v_{\text{ар}1} A/4$, а $P_2 = n_2 m v_{\text{ар}2} A/4$, для проводимости можно записать

$$U_{\text{ом}} = \frac{\left(n_1 \sqrt{\frac{8kT_1}{\pi m}} - n_2 \sqrt{\frac{8kT_2}{\pi m}} \right) A}{4(n_1 - n_2)}. \quad (3.56)$$

Если $T_1 = T_2 = T$, то это выражение упрощается:

$$U_{\text{ом}} = 36,4 A \sqrt{T/M}, \quad (3.57)$$

где M — в кг/кмоль; T — в К; A — в м^2 ; $U_{\text{ом}}$ — в $\text{м}^3/\text{с}$.

Расчет проводимости отверстия для воздуха ($M=29$ кг/кмоль) при комнатной температуре $T=298$ К из (3.57) дает в результате

$$U_{\text{ом}} = 116 \text{ А.} \quad (3.58)$$

Так как для круглого отверстия $A=\pi d^2/4$, то $U_{\text{ом}}=91d^2$ м³/с.

В области среднего вакуума при молекулярно-вязкостном режиме течения можно пользоваться приближенной формулой

$$U_{\text{омв}} = U_{\text{ом}}b + U_{\text{ов}}, \quad (3.59)$$

где

$$b = \left(1 + 2,5 \frac{b}{2L}\right) / \left(1 + 3,1 \frac{d}{2L}\right),$$

которая справедлива также в областях молекулярного и вязкостного режимов течения газа.

Рассмотрим отверстие между бесконечно большим и ограниченным объемами. В этом случае трубопровод с отверстием (рис. 3.9, б) должен иметь с точки зрения второго закона термодинамики одинаковую проводимость при течении газа в обоих возможных направлениях:

$$\frac{1}{U_{A_1}} + \frac{1}{U_{\text{тр}}} + \frac{1}{U_{A_1.A_2}} = \frac{1}{U_{A_2}} + \frac{1}{U_{\text{тр}}}, \quad (3.60)$$

где U_{A_1} и U_{A_2} — проводимости отверстий с площадями A_1 и A_2 со стороны бесконечных объемов соответственно; $U_{A_1.A_2}$ — проводимость отверстия, имеющего площадь A_2 со стороны трубопровода; $U_{\text{тр}}$ — проводимость трубопровода внутри стенки.

Решая (3.60) относительно $U_{A_1.A_2}$ и учитывая, что $U_{A_1}/U_{A_2} = A_1/A_2$, получим

$$U_{A_1.A_2} = \frac{U_{A_2}}{1 - A_2/A_1}. \quad (3.61)$$

Проводимости отверстий при любых режимах течения, рассчитанные ранее для присоединения к бесконечным объектам, применяя (3.61), можно преобразовать в проводимости отверстий, соединенных с ограниченным объектом. Форма отверстий по приведенной методике расчета не влияет на их проводимость.

§ 3.8. Течение газов в трубопроводах

В области низкого вакуума при вязкостном режиме течения газа средняя длина свободного пути молекул газа L значительно меньше диаметра трубопровода. Слой газа у поверхности трубопровода остается неподвижным, а остальные слои толщиной L движутся в условиях стационарного потока с постоянной скоростью. Рассмотрим трубопровод с круглым поперечным сечением. При ста-

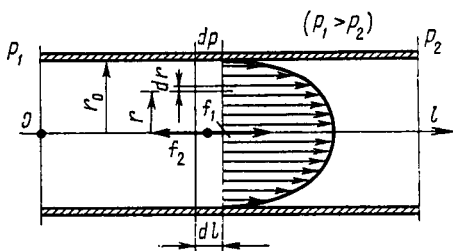


Рис. 3.11. Расчетная схема течения газа в трубопроводе при вязкостном режиме

ционарном потоке в малом элементе газового цилиндра, образованного на радиусе r приращением dr (рис. 3.11), существует равновесие движущей силы $f_1 = \pi r dp$, вызываемой разностью давлений, и силы внутреннего трения в газах $f_2 = -\eta 2\pi r dl \frac{dv}{dr}$.

Условие равновесия можно записать в виде: $f_1 - f_2 = 0$ или $\pi r^2 dp + 2\pi r \eta \frac{dv}{dr} dl = 0$.

Принимая dv/dr не зависящим от l (распределение скоростей по всей длине трубопровода постоянно), после интегрирования в пределах от 0 до l получим $(p_2 - p_1)r + 2l\eta \frac{dv}{dr} = 0$.

Вновь интегрируя по радиусу трубопровода, при начальных условиях $r=r_0, v=0$ получим параболическое распределение скоростей по сечению трубопровода: $v = (p_2 - p_1)(r_0^2 - r^2)/(4\eta l)$.

Объемный расход газа

$$V = \int_0^{r_0} v 2\pi r dr = \pi r_0^4 (p_2 - p_1) / (8\eta l)$$

Поток газа Q , протекающий через трубопровод, найдем как произведение объемного расхода V на среднее давление в трубопроводе:

$$Q = V \frac{p_2 + p_1}{2} = \frac{\pi r_0^4 (p_2 - p_1) (p_2 + p_1)}{16\eta l}$$

Согласно (3.38), запишем выражение для проводимости при вязкостном режиме течения:

$$U_{\text{тв}} = Q / (p_1 - p_2) = \pi r_0^4 (p_1 + p_2) / (16\eta l) \quad (3.62)$$

Таким образом, проводимость круглого трубопровода при вязкостном режиме течения газа обратно пропорциональна его длине и коэффициенту динамической вязкости газа, прямо пропорциональна среднему давлению в трубопроводе и четвертой степени радиуса трубопровода.

Для воздуха при $T=293$ К и $\eta=1,82 \cdot 10^{-5}$ Н/(м²·с) формулу (3.62) можно преобразовать к виду

$$U_{\text{тв}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \frac{p_1 + p_2}{2};$$

здесь d и l — в м; p — в Па; $U_{тв}$ — в м³/с.

При высоком вакууме и молекулярном режиме течения газа длина свободного пути молекул газа больше диаметра трубы, молекулы движутся независимо друг от друга, соударяясь только со стенками трубопровода.

Будем считать, что каждая из молекул, хаотически движущихся в трубопроводе, имеет постоянную составляющую переносной скорости v_n , направленной по оси трубопровода в область с меньшим давлением (рис. 3.12).

В этом случае движущая сила $f_1 = dpA$, где A — поперечное сечение трубопровода.

Уравновешивающая сила, равная общему изменению количества движения всех молекул при их ударе о стенку трубки, $f_2 = Bd l N_q m v_n$; здесь B — периметр трубопровода; $N_q = n v_{ар} / 4 = p / \sqrt{2\pi m k T}$ — число молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени.

Уравнение равновесия $f_1 - f_2 = 0$ можно записать в виде

$$dpA - Bd l N_q m v_n = 0. \quad (3.63)$$

Если в (3.36) ввести объемный расход $V = v_n A$ и использовать выражения (1.13), (1.10), (1.18), то получим

$$\frac{dp}{m p V} \sqrt{2\pi m k T} = \frac{B}{A^2} dl.$$

В стационарном режиме произведение $pV = Q$, стоящее в знаменателе, постоянно. Проинтегрируем это соотношение в пределах от p_2 до p_1 :

$$\frac{p_1 - p_2}{m Q} \sqrt{2\pi m k T} = \int_0^l \frac{B}{A^2} dl,$$

откуда поток газа

$$Q = \frac{\sqrt{2\pi m k T} (p_1 - p_2)}{m \int_0^l \frac{B}{A^2} dl}.$$

Используя (1.18) для $v_{ар}$, имеем

$$Q = \frac{\pi}{2} \frac{v_{ар} (p_2 - p_1)}{\int_0^l \frac{B}{A^2} dl}.$$

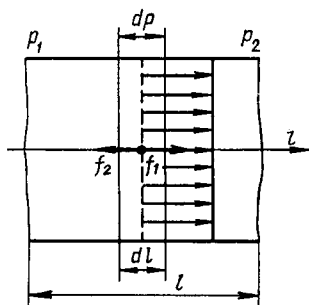


Рис. 3.12. Расчетная схема течения газа в трубопроводе при молекулярном режиме

Более точное выражение для Q получено Кнудсеном с учетом функции распределения молекул по скоростям:

$$Q = \frac{4}{3} \frac{v_{ap}(p_1 - p_2)}{\int_0^l \frac{B}{A^2} dl}$$

В этом случае проводимость трубопровода

$$U_{TM} = \frac{Q}{p_1 - p_2} = \frac{4v_{ap}}{3 \int_0^l \frac{B}{A^2} dl} \quad (3.64)$$

Для трубопровода постоянного поперечного сечения

$$U_{TM} = 4v_{ap}A^2/(3Bl) \quad (3.65)$$

В случае круглого поперечного сечения

$$U_{TM} = \frac{\pi d^3 v_{ap}}{12l} = 38,1 \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (3.66)$$

где d и l выражены в м; M — в кг/кмоль; T — в К; U — в м³/с. Таким образом, проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения не зависит от давления.

Для воздуха при $T=293$ К проводимость цилиндрического трубопровода круглого поперечного сечения

$$U_{TM} = 121d^3/l \quad (3.67)$$

В области среднего вакуума в молекулярно-вязкостном режиме течения газа проводимость трубопроводов можно рассчитывать по полуэмпирической формуле, предложенной Кнудсеном:

$$U_{TMb} = bU_{TM} + U_{Tb} \quad (3.68)$$

Здесь U_{Tb} — проводимость трубопровода при вязкостном режиме; U_{TM} — проводимость трубопровода при молекулярном режиме; b — коэффициент, равный 0,8 на границе с вязкостным режимом течения и 1 на границе с молекулярным режимом.

Среднее значение $b=0,9$ может быть принято постоянным для технических расчетов. На рис. 3.13 по-

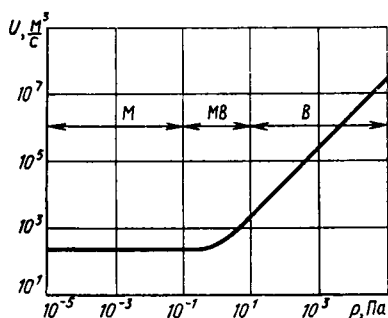


Рис. 3.13. Зависимость проводимости трубопровода $d=1$ м, $l=1$ м от давления для воздуха при $T=293$ К:

М — молекулярный, МВ — молекулярно-вязкостный, В — вязкостный режим течения газа

казана зависимость проводимости круглого трубопровода от давления.

Определить проводимости некруглых трубопроводов можно по той же методике, которая была использована для определения проводимостей круглых трубопроводов. Расчетные формулы для некоторых форм трубопроводов представлены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Формулы для расчета проводимости отверстий и трубопроводов для воздуха при 293 К

Виды элементов систем	Режимы	
	вязкостный	молекулярный
Круглое отверстие диаметром d , м	$U = 160d^2$ при $p_2/p_1 < 0,1$	$U = 91d^2$
Отверстие произвольной формы площадью A , м ²	$U = 200A$ при $p_2/p_1 < 0,1$	$U = 116A$
Трубопровод диаметром d и длиной l , м	$U = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} p_{\text{ср}}$	$U = 121 \frac{d^3}{l}$
Трубопровод прямоугольного сечения $a \geq b$, м	$U = 865f \frac{ab^3}{l} p_{\text{ср}}$	$U = 308\varphi \frac{a^2b^2}{l(a+b)}$
Трубопровод с равносторонним треугольным сечением; a — сторона треугольника, м	$U = 299 \frac{a^4}{l} p_{\text{ср}}$	$U = 48,1 \frac{d^3}{l}$
Трубопровод эллиптического сечения; a — большая, b — малая оси эллипса, м	$U = 2,72 \cdot 10^3 \times$ $\times \frac{a^2b^3}{(a^2 + b^2)l} p_{\text{ср}}$	$U = 171 \frac{a^2b^2}{l \sqrt{a^2 + b^2}}$
Трубопровод диаметром d_1 с коаксиально расположенным стержнем диаметром d_2 , м	$U = 1,36 \cdot 10^3 \frac{p_{\text{ср}}}{l} \times$ $\times \left[d_1^4 - d_2^4 - \frac{(d_1^2 - d_2^2)}{\ln d_1/d_2} \right]$	$U = 121 \frac{(d_1 - d_2)^2(d_1 + d_2)}{l}$

Примечания. 1. U выражено в м³/с; p — в Па.

2.	a/b	1	2	5	10	100	∞
f		2,3	3,7	4,7	5,0	5,3	5,3
φ		1,1	1,2	1,3	1,4	—	—

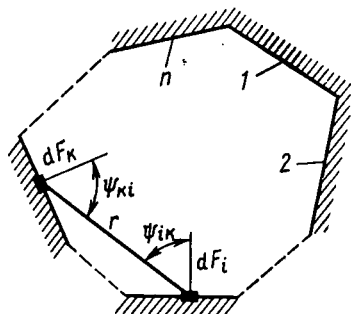


Рис. 3.14. Расчетная схема метода угловых коэффициентов

§ 3.9. Расчет молекулярных потоков методом угловых коэффициентов

В области высокого вакуума для анализа молекулярных потоков применяют метод угловых коэффициентов. Большинство вакуумных систем при анализе молекулярных потоков может быть разбито на ряд однородных поверхностей, имеющих по всей площади постоянное значение коэффициентов поглощения β и отражения ρ , причем $\beta + \rho = 1$.

Будем считать, что при десорбции молекул со стенок выполняется закон косинуса. Угловое распределение молекул на входе в вакуумную систему можно приближенно считать также подчиняющимся косинусному закону. Внешнюю газовую нагрузку будем рассматривать как десорбционный поток с входного сечения.

В этом случае для системы, состоящей из однородных поверхностей (рис. 3.14), молекулярный поток, ударяющийся о i -поверхность,

$$Q_i = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \phi_{ki} Q_{\rho k}; \quad (3.69)$$

поток молекул, покидающих i -поверхность,

$$Q_{\rho i} = Q_{\lambda i} + \rho_i Q_i; \quad (3.70)$$

количество молекул, поглощаемых в единицу времени на i -поверхности,

$$Q_{\beta i} = \beta_i Q_i, \quad (3.71)$$

где $Q_{\rho k}$ — молекулярный поток, покидающий k -поверхность; $Q_{\lambda i}$ — газовыделение с i -поверхности; ρ_i — коэффициент отражения i -поверхности; ϕ_{ki} — угловой коэффициент, определяющий долю молекулярного потока, падающего от k -поверхности на i -поверхность.

Для определения угловых коэффициентов запишем выражение для молекулярного потока, падающего с элементарной площадки dF_k на элементарную площадку dF_i . С учетом закона косинуса имеем

$$d^2 Q_{dF_k, dF_i} = \frac{dQ_{dF_k} \cos \psi_{ki}}{\pi} d\omega, \quad (3.72)$$

где dQ_{dF_k} — молекулярный поток, покидающий поверхность dF_k ;

$d\omega = dF_i \cos \psi_{ik} / r^2$ — телесный угол, под которым площадь dF_i видна из площадки dF_k . Подставляя в (3.72) выражение для элементарного угла $d\omega$, получим

$$d^2 Q_{dF_k, dF_i} = dQ_{dF_k} \frac{\cos \psi_{ki} \cos \psi_{ik}}{\pi r^2} dF_i, \quad (3.73)$$

откуда вероятность вылета молекулы с поверхности dF_k на поверхность dF_i или дифференциальный угловой коэффициент

$$d\varphi_{dF_k, dF_i} = \frac{d^2 Q_{dF_k, dF_i}}{dQ_{dF_k}} = \frac{\cos \psi_{ki} \cos \psi_{ik}}{\pi r^2} dF_i. \quad (3.74)$$

Интегрируя (3.74) по площади F_i , можно получить локальный угловой коэффициент, определяющий массообмен между элементарной площадкой dF_k и поверхностью F_i :

$$d\varphi_{dF_k, F_i} = \int_{F_i} \frac{\cos \psi_{ki} \cos \psi_{ik}}{\pi r^2} dF_i. \quad (3.75)$$

Средний угловой коэффициент определяется после второго интегрирования по площади F_k :

$$\varphi_{ki} = \frac{1}{F_k} \int_{F_k} \int_{F_i} \frac{\cos \psi_{ki} \cos \psi_{ik}}{\pi r^2} dF_k dF_i. \quad (3.76)$$

Полученное выражение для расчета угловых коэффициентов определяется только геометрическими характеристиками исследуемой системы. Они аналогичны угловым коэффициентам теории лучистого теплообмена, обладающими свойствами взаимности, замкнутости и аддитивности:

1) угловые коэффициенты взаимодействующих поверхностей обратно пропорциональны их площадям:

$$\varphi_{21} F_2 = \varphi_{12} F_1; \quad (3.77)$$

2) для замкнутой поверхности, состоящей из n взаимодействующих поверхностей, сумма угловых коэффициентов для любой поверхности по отношению к остальным равна единице:

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \varphi_{ik} = 1; \quad (3.78)$$

3) угловой коэффициент двух взаимодействующих поверхностей, одна из которых разделена на n частей, равен сумме отдельных угловых коэффициентов:

$$\varphi_{ik} = \sum_{j=1}^n \varphi_{ikj}. \quad (3.79)$$

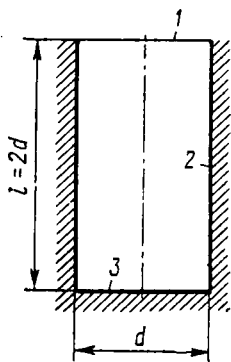


Рис. 3.15. Схема рабочей камеры с сорбирующими стенками

В табл. 3.8 приведены значения угловых коэффициентов для некоторых форм поверхностей, часто встречающихся в вакуумных установках.

Зная угловые коэффициенты, можно составить систему уравнений (3.70), решение которой позволяет найти все массообменные характеристики: суммарный поток $Q_{\rho i}$, покидающий поверхность F_i ; поток молекул Q_i , удаляющийся с поверхности F_i ; поток молекул $Q_{\rho i}$, поглощаемый на поверхности F_i .

В качестве иллюстрации рассмотрим пример расчета коэффициента захвата откачного устройства в виде цилиндра диаметром d и высотой $l=2d$ с сорбирующими стенками 2 (рис. 3.15). Молекулы входят в цилиндр с косинусным угловым распределением. Газовыделение со всех остальных поверхностей отсутствует.

Коэффициент отражения молекул от входного отверстия (поверхность 1) $\rho_1=0$, на стенках $\rho_{2,3}=0,5$.

Система уравнений (3.70) для рассматриваемого объекта принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} Q_{\rho 1} &= Q_{\Delta 1} + \rho_1 (\varphi_{11} Q_{\rho 1} + \varphi_{21} Q_{\rho 2} + \varphi_{31} Q_{\rho 3}); \\ Q_{\rho 2} &= Q_{\Delta 2} + \rho_2 (\varphi_{12} Q_{\rho 1} + \varphi_{22} Q_{\rho 2} + \varphi_{32} Q_{\rho 3}); \\ Q_{\rho 3} &= Q_{\Delta 3} + \rho_3 (\varphi_{13} Q_{\rho 1} + \varphi_{23} Q_{\rho 2} + \varphi_{33} Q_{\rho 3}). \end{aligned} \quad (3.80)$$

Для нахождения углового коэффициента φ_{31} , определяющего вероятность попадания молекул с поверхности 3 на поверхность 1, воспользуемся табл. 3.8, откуда


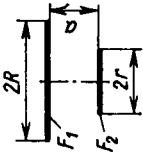

$$\varphi_{31} = \frac{l^2}{d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{d^2}{l^2}} - 1 \right)^2. \quad (3.81)$$

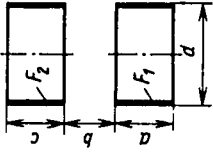
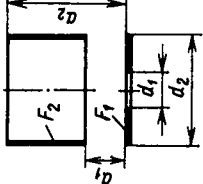
Для $l=2d$ из (3.81) $\varphi_{31}=0,057$. Для определения остальных угловых коэффициентов воспользуемся условиями симметрии $\varphi_{31}=\varphi_{13}$; $\varphi_{21}=\varphi_{23}$; $\varphi_{12}=\varphi_{32}$; логическими соображениями $\varphi_{11}=\varphi_{33}=0$; свойством взаимности $\varphi_{12}=\varphi_{21} \frac{F_2}{F_1}$; свойством замкнутости $\varphi_{12}=1-\varphi_{13}$; $\varphi_{22}=1-\varphi_{21}-\varphi_{23}$, которые позволяют найти все остальные коэффициенты:

$$\begin{vmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{21} & \varphi_{31} \\ \varphi_{12} & \varphi_{22} & \varphi_{32} \\ \varphi_{13} & \varphi_{23} & \varphi_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0,943 & 0,057 \\ 0,236 & 0,528 & 0,236 \\ 0,057 & 0,943 & 0 \end{vmatrix}.$$

Решая систему (3.80), получим $Q_{\rho 1}=Q_{\Delta 1}$; $Q_{\rho 2}=0,66Q_{\Delta 1}$; $Q_{\rho 3}=0,138Q_{\Delta 1}$. Поток молекул, выходящий из объекта через поверх-

Угловые коэффициенты для расчета вакуумных систем

Название элементов	Схемн	Значения коэффициентов	Используемые обозначения
Тело, не имеющее вогнутостей, внутри другого тела		$\varphi_{11} = 0$ $\varphi_{12} = 1$ $\varphi_{21} = F_1 / F_2$	—
Два соосных диска		$\varphi_{12} = \frac{1}{2x^2} \left[1 + x^2 + z^2 - \sqrt{(1 + x^2 + z^2)^2 - 4x^2 z^2} \right]$ $\varphi_{21} = \frac{x^2}{z^2} \varphi_{12}$ $\varphi_{13} = \varphi_{21} = \frac{1}{4x^2} (\sqrt{1 + 4x^2} - 1)^2$	$x = r/a$ $z = R/a$ $x = z$
Внутренняя поверхность цилиндра		$\varphi_{11} = 1 + y - \sqrt{y^2 + 1}$	$y = a/d$

Название элементов	Схемы	Значения коэффициентов	Используемые обозначения
<p>Цилиндр и цилиндр</p>		$\varphi_{12} = \frac{1}{2y} [2yt + (y+z)\sqrt{1+(y+z)^2} - z\sqrt{1+z^2} - (y+t+z)\sqrt{(y+t+z)^2+1} + (t+z)\sqrt{1+(t+z)^2}]$ $\varphi_{21} = \frac{y}{t} \varphi_{12}$ $\varphi_{12} = \frac{1}{2y} [2yt + y\sqrt{1+y^2} - (y+t) \times \times \sqrt{1+(y+t^2)} + t\sqrt{1+t^2}]$	<p>$y = a/d$ $t = c/d$ $z = b/d$</p> <p>$z = 0$</p>
<p>Цилиндр и диск</p>		$\varphi_{12} = \frac{1}{2(1-f^2)} [4t\sqrt{1+t^2} - 4y\sqrt{1+y^2} - \sqrt{(4t^2+f^2+1)^2-4f^2} + \sqrt{(4y^2+f^2+1)^2-4f^2}]$ $\varphi_{21} = \frac{1-f^2}{4(t-y)} \varphi_{12}$	<p>$f = d_2/d_1$ $t = a_2/d_1$</p> <p>$y = a_1/d_1$</p>

ность I , определим по формуле $Q_1 = \varphi_{11}Q_{p1} + \varphi_{21}Q_{p2} + \varphi_{31}Q_{p3} = 0,235Q_{д1}$. Коэффициент захвата откачного устройства (вероятность поглощения молекулы, вошедшей в объект через входное отверстие) $\eta = (Q_{д1} - Q_1)/Q_{д1} = 0,765$.

§ 3.10. Имитационное моделирование молекулярных потоков

Имитационное моделирование течения газа в вакуумных системах может осуществляться методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). Это численный метод решения математических задач путем моделирования случайных величин с заданным законом распределения, построения вероятностных моделей и статистической оценки результатов. Этим методом можно решать любые задачи, сводя их к расчету математического ожидания. Наибольшее распространение метод статистических испытаний получил при решении как стационарных, так и нестационарных задач, связанных с течением газов в элементах вакуумных систем в высоком и среднем вакууме, когда движение каждой из молекул осуществляется хаотически путем последовательных столкновений со стенками элемента. Вероятность перехода молекул из одного сечения элемента вакуумной системы в другое определяется геометрией исследуемого элемента. По вероятностям перехода и известным концентрациям газа можно определить газовые потоки, возникающие в вакуумных системах.

Рассмотрим применение метода статистических испытаний к моделированию стационарного течения газа через вакуумный элемент, имеющий один вход, один выход и произвольную внутреннюю конфигурацию (рис. 3.16). Исходными данными для расчета должны быть: конфигурация элементов, распределение молекул по площади входного отверстия, угловое распределение молекул на входе, угловое распределение молекул, десорбирующихся с внутренних поверхностей вакуумных элементов.

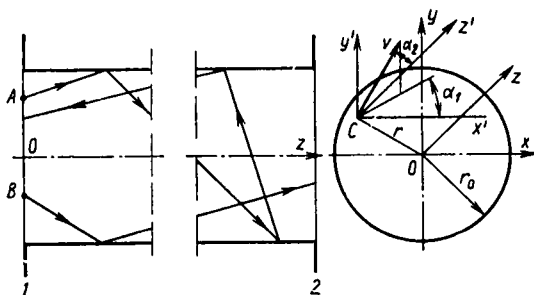


Рис. 3.16. Элемент вакуумной системы произвольной конфигурации

Конфигурацию элемента всегда можно с соответствующими ограничениями приближенно описать набором уравнений второго порядка

$$\begin{aligned} a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + a_{12}xy + a_{23}yz + \\ + a_{13}xz + a_{14}x + a_{24}y + a_{34}z + a_{44} = 0. \end{aligned} \quad (3.82)$$

При удачном выборе положения системы координат уравнения (3.82) сильно упрощаются. Уравнение цилиндра, ось которого совпадает с осью z , имеет вид $x^2 + y^2 = r_0^2$; уравнение плоскости, перпендикулярной оси z , — вид $z = l$ и т. д.

Условия на входе в элемент считаем соответствующими присоединению элемента к бесконечно большому объекту. Из молекулярно-кинетической теории известно, что из бесконечно большого объекта молекулы, попадающие во входное отверстие элемента, равномерно распределены по площади и имеют косинусное угловое распределение.

На стенках, ограничивающих внутреннее пространство элемента, принимаем, что десорбция молекул происходит в соответствии с законом косинуса.

Моделируемыми случайными величинами являются координаты точки входа молекулы в элемент и два угла, определяющие направление движения молекул в элементе от точки входа или с поверхности элемента.

Координатами точки входа для круглого входного отверстия (рис. 3.16) являются угол φ и радиус r . Для обеспечения равномерного входа молекул по всей площади необходимо, чтобы угол φ был равномерно распределен в интервале от 0 до 2π . Генерируя датчиком случайных чисел, равномерно распределенным в интервале от 0 до 1, случайное число ξ [0,1], получим случайную величину угла

$$\varphi = 2\pi\xi [0,1]. \quad (3.83)$$

Для определения случайного радиуса входа молекулы в систему запишем число молекул, попадающих в кольцо шириной dr на радиусе r ,

$$dN = N \frac{2\pi r dr}{\pi r_0^2} = N \frac{2r}{r_0^2} dr.$$

Вероятность попадания молекулы в круг площадью πr^2

$$P(r) = \int_0^r \frac{2r}{r_0^2} dr = \frac{r^2}{r_0^2}.$$

Моделируя вероятность $P(r)$ новым случайным числом ξ [0,1],

равномерно распределенным в интервале от 0 до 1, получим

$$r = r_0 \sqrt{\xi} \sqrt{[0, 1]}. \quad (3.84)$$

Направление вектора скорости молекулы v в точке входа определяется двумя углами: α_1 и α_2 (рис. 3.16). Угол α_1 образован осью x' и проекцией вектора скорости на плоскость $x'y'$. Угол α_2 образуется между осью z' и вектором скорости v . В соответствии с принятыми граничными условиями случайный угол α_1 равномерно распределен в интервале от 0 до 2π :

$$\alpha_1 = 2\pi\xi [0, 1], \quad (3.85)$$

а для нахождения случайного угла α_2 , имеющего косинусное распределение, необходимо воспользоваться выражением (2.16):

$$\alpha_2 = \arcsin(\sqrt{\xi} \sqrt{[0, 1]}). \quad (3.86)$$

Уравнения (3.83)...(3.86) позволяют моделировать все необходимые для решения задачи случайные величины φ , r , α_1 и α_2 .

В случае присутствия в элементе сорбирующих поверхностей должны быть заданы дополнительные случайные числа, характеризующие поглощение молекул.

Вероятностная модель стационарного течения газа описывает случайную траекторию движения молекул в элементе. Для математического моделирования траектории движущихся молекул газа воспользуемся уравнением прямой в локальной для каждой поверхности системе координат

$$x'/b' = y'/m' = z'/n', \quad (3.87)$$

где b' , m' , n' — направляющие косинусы каждой прямой в локальной системе координат, определяемые углами α_1 и α_2 .

Для определения точки встречи молекулы с поверхностью элемента нужно преобразовать уравнение (3.87) в глобальную систему координат, в которой записаны уравнения, определяющие конфигурацию элемента:

$$\frac{x - x_1}{b} = \frac{y - y_1}{m} = \frac{z - z_1}{n}, \quad (3.88)$$

где x_1 , y_1 , z_1 — координаты точки вылета молекулы в глобальной системе координат; b , m , n — направляющие косинусы прямой в глобальной системе координат, которые определяют из преобразования

$$\begin{pmatrix} b \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} b_1 & m_1 & n_1 \\ b_2 & m_2 & n_2 \\ b_3 & m_3 & n_3 \end{vmatrix} \begin{pmatrix} b' \\ m' \\ n' \end{pmatrix},$$

где b_1 , b_2 , b_3 — направляющие косинусы глобальных осей по отно-

шению к оси x' ; m_1, m_2, m_3 — по отношению к оси y' ; n_1, n_2, n_3 — по отношению к оси z' .

Совместное решение уравнения (3.88) со всеми уравнениями (3.82), определяющими конфигурацию элемента, позволяют получить точки пересечения. Пересечение прямой с плоскостью дает одну точку, с цилиндром — две. Логически могут быть отброшены точки пересечения, которые не лежат на внутренней поверхности элемента, в соответствии с ограничениями к уравнению (3.82) на внутренней поверхности элемента. Из оставшихся необходимо выбрать одну точку, находящуюся на минимальном расстоянии от исходной по направлению полета молекулы.

Для найденной таким образом точки пересечения вновь определяется случайное направление вылета. Углы вылета находятся аналогично α_1 и α_2 [см. (3.85) и (3.86)], при этом они измеряются в локальной системе координат, в которой ось z' направлена по нормали к соответствующей поверхности вылета. Движение молекулы прослеживается до тех пор, пока она не покинет элемент через входное или выходное отверстие.

Исход каждого испытания есть случайная величина X , которая может иметь два значения: 0 и 1.

Будем считать, что молекула проходит элемент, когда $X=1$. Траектория такой молекулы начинается от точки B на рис. 3.16.

Если молекула возвращается обратно, то $X=0$. Пример траектории такой молекулы, начинающейся от точки A , показан на рис. 3.16. Вероятность прохождения молекулой элемента от входного сечения 1 до выходного сечения 2 находится как среднееарифметическое значений случайной величины X при достаточно большом числе испытаний N :

$$P_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{N}(X_1 + X_2 + \dots + X_N), \quad (3.89)$$

где X_1, \dots, X_N — значения случайной величины X для соответствующего испытания.

Поток газа, проходящий через элемент,

$$Q = Q_0 P_{1 \rightarrow 2}, \quad (3.90)$$

где Q_0 — поток газа, входящий в элемент через входное отверстие.

Проведем статистическую оценку результатов. Определим характеристики случайной величины X . Пусть $M(X)$, $M(X^2)$ — математические ожидания случайных величин X и X^2 :

$$M(X) = \sum_{i=1}^2 P_i Y_i; \quad M(X^2) = \sum_{i=1}^2 P_i Y_i^2,$$

где P_i — вероятности исходов Y_i случайной величины X . Вероятность P_1 , соответствующая $Y_1=1$, равна $P_{1 \rightarrow 2}$, а вероятность P_2 , со-

ответствующая $Y_2=0$, равна $1-P_{1 \rightarrow 2}$. Таким образом,

$$M(X) = M(X^2) = P_{1 \rightarrow 2}. \quad (3.91)$$

Используем значения полученных математических ожиданий для нахождения дисперсии случайной величины X :

$$D(X) = M(X^2) - [M(X)]^2 = P_{1 \rightarrow 2}(1 - P_{1 \rightarrow 2}). \quad (3.92)$$

Среднеквадратичное отклонение случайной величины X

$$\sigma = \sqrt{D(X)} = \sqrt{P_{1 \rightarrow 2}(1 - P_{1 \rightarrow 2})}. \quad (3.93)$$

В соответствии с формулой Чебышева при любом фиксированном $\varepsilon > 0$

$$P(|\bar{X}_N - M(X)| \leq \varepsilon) \geq 1 - \gamma. \quad (3.94)$$

При достаточно большом числе испытаний N среднееарифметическое \bar{X}_N отличается от $M(X)$ не более чем на ε с вероятностью не менее чем $1 - \gamma$, где

$$\gamma = D(X)/(N\varepsilon^2). \quad (3.95)$$

Относительная погрешность с учетом (3.95)

$$\delta = \frac{\varepsilon}{P_{1 \rightarrow 2}} = \frac{1}{P_{1 \rightarrow 2}} \sqrt{\frac{D(X)}{N\gamma}}. \quad (3.96)$$

Воспользовавшись выражением (3.93) для $D(X)$, преобразуем (3.96), тогда

$$\delta = \sqrt{\frac{1 - P_{1 \rightarrow 2}}{P_{1 \rightarrow 2} N \gamma}}. \quad (3.97)$$

При фиксированном значении γ ошибка в расчетах убывает пропорционально корню квадратному из числа испытаний.

Число испытаний можно определить из (3.97):

$$N = R \frac{1 - P_{1 \rightarrow 2}}{P_{1 \rightarrow 2}}, \quad (3.98)$$

где $R = 1/(\delta^2 \gamma)$. При $P_{1 \rightarrow 2} = 0,5$ необходимое число испытаний $N = R$. В табл. 3.9 приведены значения числа испытаний R для различных значений относительной погрешности расчета δ и вероятности выполнения оценки $1 - \gamma$.

Из таблицы видно, что при $P_{1 \rightarrow 2} = 0,5$ погрешность 10% с вероятностью 0,99 может быть достигнута при 10 000, а с вероятностью 0,9 — при 1000 испытаний.

Недостатком метода статистических испытаний является необходимость проведения большого числа испытаний для получения приемлемой точности, что требует применения вычислительной техники.

Значения коэффициента R

δ	$1-\gamma$			
	0,99	0,98	0,97	0,96
0,01	$1,0 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$
0,02	$2,5 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	$8,3 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$
0,03	$1,1 \cdot 10^5$	$5,6 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$
0,04	$6,3 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$
0,05	$4,0 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$
0,10	$1,0 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$

Продолжение табл. 3.9

δ	$1-\gamma$			
	0,95	0,94	0,92	0,90
0,01	$2,0 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$
0,02	$5,0 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$
0,03	$2,2 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$
0,04	$1,3 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$	$7,8 \cdot 10^3$	$6,3 \cdot 10^3$
0,05	$8,0 \cdot 10^3$	$6,7 \cdot 10^3$	$5,0 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^3$
0,10	$2,0 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$

Достоинством метода является универсальность вычислительно-го алгоритма. Для расчета нового элемента требуется только аналитически задать его конфигурацию.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности газов при низком вакууме не зависят от давления?
2. Каковы наиболее эффективные способы передачи теплоты в областях низкого и высокого вакуума?
3. Как коэффициент диффузии газов зависит от давления в областях низкого и высокого вакуума?
4. Как при различных степенях вакуума изменяется равновесное давление по длине вакуумной системы, имеющей участки с различной температурой?
5. Нужно ли вводить поправку в показания манометрического преобразователя, отделенного от откачиваемого объекта охлаждаемой ловушкой?
6. В чем физический смысл понятия проводимости элемента вакуумной системы? Какова зависимость проводимости от давления при различных режимах течения газа?
7. Чем определяется критическое отношение давлений при течении газа через отверстие в вязкостном режиме?
8. Какие вы знаете способы ионизации газов?
9. Почему минимум пробивного напряжения в вакууме находится в области среднего вакуума?
10. При каких степенях вакуума наблюдается свечение газа при электрическом разряде?

МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА

§ 4.1. Общая характеристика вакуумных насосов

Вакуумные насосы по назначению подразделяются на сверхвысоковакуумные, высоковакуумные, средневакуумные и низковакуумные, а в зависимости от принципа действия — на механические и физико-химические.

Основными параметрами любого вакуумного насоса являются быстрота действия, предельное давление, наименьшее рабочее давление, наибольшее рабочее давление, наибольшее давление запуска и наибольшее выпускное давление.

Рассмотрим схему простейшей вакуумной системы (рис. 4.1), состоящую из откачиваемого объекта 1, манометрических преобразователей 2 и 3, насоса 4 и соединительного трубопровода 5. Течение газа из откачиваемого объекта в насос происходит за счет разности давлений ($p_2 > p_1$), причем $p_2 > p_1$.

Быстроту откачки насоса S_i в произвольном сечении соединительного трубопровода можно определить как объем газа, проходящий через это сечение в единицу времени: $S_i = dV_i/dt$.

Объем газа, поступающий в единицу времени из откачиваемого объекта в трубопровод через сечение II при давлении p_2 , называется быстротой откачки объекта или эффективной быстротой откачки насоса:

$$S_{эф} = dV_2/dt. \quad (4.1)$$

Объем газа, удаляемый насосом в единицу времени через входной патрубок (сечение I) при давлении p_1 — это быстрота действия насоса:

$$S_n = dV_1/dt. \quad (4.2)$$

Отношение эффективной быстроты откачки насоса к скорости действия называется коэффициентом использования насоса:

$$K_n = S_{эф}/S_n. \quad (4.3)$$

Поток газа, проходящий через входное сечение насоса, называется его производительностью. Для стационарного потока выполняется условие сплошности

$$Q = p_1 S_n = p_2 S_{эф} = p_i S_i. \quad (4.4)$$

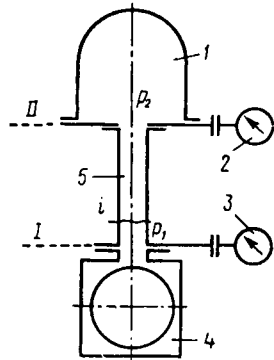


Рис. 4.1. Схема вакуумной системы

Установим связь между тремя основными характеристиками вакуумной системы: быстротой действия насоса S_n , эффективной быстротой откачки объекта $S_{эф}$ и проводимостью вакуумной системы между насосом и откачиваемым объектом U . Согласно (4.4) и (3.38), можно записать

$$\begin{aligned} S_n &= Q/p_1 = U(p_2 - p_1)/p_1; \\ S_{эф} &= Q/p_2 = U(p_2 - p_1)/p_2. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Если переписать (4.5) в виде

$$\frac{1}{S_n} = \frac{p_1}{(p_2 - p_1)U}; \quad \frac{1}{S_{эф}} = \frac{p_2}{(p_2 - p_1)U},$$

то после вычитания первого выражения из второго получим

$$\frac{1}{S_{эф}} - \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U}. \quad (4.6)$$

Уравнение (4.6) называют основным уравнением вакуумной техники. Его можно также переписать в виде

$$S_{эф} = S_n U / (S_n + U). \quad (4.7)$$

При условии $S_n = U$ из (4.7) получим, что $S_{эф} = 0,5S_n$. Если $U \rightarrow \infty$, то $S_{эф} \rightarrow S_n$; при $U \rightarrow 0$ следует, что $S_{эф} \rightarrow 0$.

Вводя в основное уравнение коэффициент использования насоса K_n , согласно (4.3), получим два полезных соотношения:

$$K_n = U / (S_n + U); \quad (4.8)$$

$$U = S_n K_n / (1 - K_n). \quad (4.9)$$

Графическая интерпретация уравнения (4.8) приведена на рис. 4.2. Максимальное значение коэффициента использования насоса равно единице.

Предельное давление насоса $p_{пр}$ — это минимальное давление, которое может обеспечить насос, работая без откачиваемого объекта. Быстрота действия насоса при приближении к предельному давлению стремится к нулю.

Предельное давление большинства вакуумных насосов определяется газовой выделением материалов, из которых изготовлен насос, перетеканием газов через зазоры и другими явлениями, возникающими в процессе откачки.

Наименьшее рабочее давление вакуумного насоса p_m — это минимальное давление, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия. Наименьшее рабочее давление

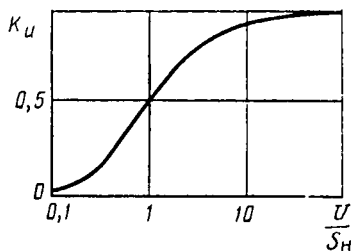


Рис. 4.2. Зависимость коэффициента использования насоса от отношения проводимости к скорости действия насоса

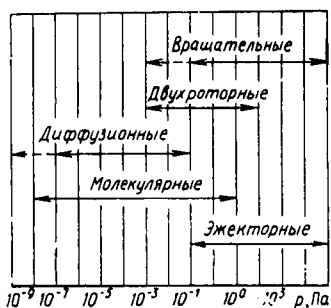


Рис. 4.3. Диапазоны рабочих давлений механических вакуумных насосов:

— промышленные образцы; ---- лабораторные образцы

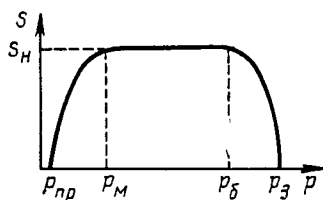


Рис. 4.4. Основные характеристики вакуумного насоса — зависимость скорости действия от давления на входе в насос

примерно на порядок выше предельного. Использование насоса для работы при давлениях между предельным и наименьшим рабочим экономически неоправданно из-за ухудшения его удельных характеристик.

Наибольшее рабочее давление вакуумного насоса $p_б$ — это максимальное давление, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия. В рабочем диапазоне от наименьшего до наибольшего рабочего давления обеспечивается эффективное использование насоса. Рабочие диапазоны давлений вакуумных насосов в основном определяются их принципом действия и приближенно показаны на рис. 4.3 (пунктир соответствует лабораторным образцам насосов).

Давление запуска вакуумного насоса $p_з$ — это максимальное давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу. Давление запуска обычно заметно превышает наибольшее рабочее давление. Для некоторых типов насосов, например магнитоэлектрических, это различие может достигать 2...3 порядков.

Параметры вакуумных насосов показаны на основной характеристике вакуумного насоса — зависимости скорости действия от его входного давления (рис. 4.4).

§ 4.2. Механические вакуумные насосы

Среди механических вакуумных насосов можно выделить объемные и молекулярные. *Объемные* насосы осуществляют откачку за счет периодического изменения объема рабочей камеры. Имеется несколько конструктивных вариантов таких насосов; поршневой, жидкостно-кольцевой, ротационный.

Молекулярные насосы работают за счет передачи молекулам газа количества движения от твердой, жидкой или парообразной

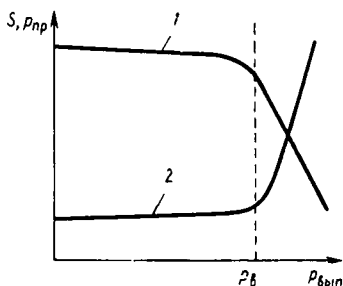


Рис. 4.5. Зависимость скорости откачки и предельного давления от выпускного давления:

1 — скорость откачки; 2 — предельное давление

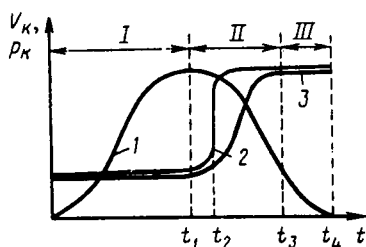


Рис. 4.6. Диаграмма работы насосов объемного действия

быстродвижущейся поверхности. Среди них различают водоструйные, эжекторные, диффузионные, молекулярные с одинаковым направлением движения откачивающей поверхности и молекул газа, турбомолекулярные с взаимно перпендикулярным движением твердых поверхностей и откачиваемого газа. Характеристики таких насосов могут быть рассчитаны на основании закономерностей внутреннего трения в газах.

Дополнительным обязательным параметром механических вакуумных насосов является наибольшее выпускное давление p_b — максимальное давление в выходном сечении насоса, при котором он может осуществлять откачку. При выпускных давлениях, меньших давления p_b , скорость откачки и предельное давление насосов слабо зависят от выпускного давления. Если выпускное давление превысит значение p_b , то происходит так называемый срыв насоса, сопровождающийся резким ухудшением его предельного давления и скорости откачки (рис. 4.5).

§ 4.3. Объемная откачка

В процессе объемной откачки выполняются следующие основные операции: 1) всасывание газа за счет расширения рабочей камеры насоса; 2) уменьшение объема рабочей камеры и сжатие находящегося в ней газа; 3) удаление сжатого газа из рабочей камеры в атмосферу или насос предварительного разрежения.

Диаграмма работы насосов объемного действия — зависимость объема V_k и давления p_k в камере насоса от времени показана на рис. 4.6. В течение времени t_1 осуществляется всасывание газа (область I), в промежутке от t_1 до t_3 — сжатие газа (область II), от t_3 до t_4 — выхлоп (область III), затем цикл повторяется вновь. Кривые 1 и 3 представляют собой соответственно зависимости объема и дав-

ления в рабочей камере от времени. Кривая 2 соответствует изменению давления в режиме работы с напуском балластного газа в момент времени t_2 .

Балластный газ напускается при откачке паров воды или органических растворителей, давление насыщенных паров которых p_T при рабочей температуре в насосе находится в промежутке от предельного давления $p_{пр}$ до максимального выпускного давления. Напуск балластного газа снижает степень сжатия и предотвращает конденсацию откачиваемых паров в объеме насоса.

Геометрическая быстрота объемной откачки равна произведению объема рабочей камеры насоса на частоту циклов откачки n : $S_r = V_k n$.

Сопrotивление входного патрубка уменьшает быстроту откачки. Согласно основному уравнению вакуумной техники (4.7), максимальная быстрота действия насоса

$$S_{max} = S_r U / (S_r + U), \quad (4.10)$$

где U — проводимость входного патрубка насоса.

Реальная быстрота откачки окажется еще меньше из-за обратного потока газа в насосе. Обратный поток появляется вследствие перетечек газа и наличия вредного пространства в насосе, а в высоком вакууме — из-за диффузии паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объект.

Производительность откачки при молекулярном режиме течения газа равна разности прямого и обратного потоков:

$$Q = Q_n - Q_{об}, \quad (4.11)$$

где $Q = S_n p$; $Q_n = S_{max} p$.

При $p = p_{пр}$ производительность откачки $Q = 0$, что позволяет в этом случае, согласно (4.11), записать

$$Q_{об} = Q_n = S_{max} p_{пр}.$$

Подставляя это выражение в (4.11), получим для любого p

$$S_n = S_{max} (1 - p_{пр}/p). \quad (4.12)$$

С учетом (4.10) это выражение можно записать в следующем виде:

$$S_n = \frac{S_r U}{S_r + U} \left(1 - \frac{p_{пр}}{p} \right) = K_\lambda S_r,$$

где $K_\lambda = U(1 - p_{пр}/p)/(S_r + U)$ — коэффициент подачи.

Реальная быстрота действия оказывается в K_λ раз меньше, чем геометрическая быстрота откачки. Для увеличения быстроты откачки необходимо увеличивать объем рабочей камеры V_k и проводимость входного патрубка U . Частота циклов n имеет оптимальное значение, при превышении которого возможен перегрев насоса или

незаполнение рабочей камеры откачиваемым газом. Современные насосы работают при $n=1400$ об/мин.

Для определения предельного давления запишем уравнение материального баланса

$$G_0 + G_B = G_1,$$

где G_0 — количество газа в откачиваемом объекте до начала цикла откачки; G_B — количество газа, поступающего в откачиваемый объем в процессе откачки; G_1 — количество газа в объекте и насосе после выполнения одного цикла откачки. Это уравнение можно переписать в виде

$$p_0 V_p + \alpha_1 V_B p_{\text{вых}} = p_1 (V_p + V_k), \quad (4.13)$$

где V_p — объем откачиваемого объекта (реципиента); V_k — объем рабочей камеры насоса; V_B — объем вредного пространства; $p_{\text{вых}}$ — давление выхлопа; α_1 — коэффициент, учитывающий газовыделение насоса и степень прорыва газа; p_0, p_1 — начальное и конечное давления в откачиваемом объекте.

Решим уравнение (4.13) относительно давления p_1 :

$$p_1 = p_0 \frac{V_p}{V_p + V_k} + \alpha_1 \frac{V_B}{V_p} p_{\text{вых}} \frac{V_p}{V_p + V_k}.$$

Осуществляя еще один цикл откачки, получим

$$p_2 = p_1 \frac{V_p}{V_p + V_k} + \alpha_1 \frac{V_B}{V_p} p_{\text{вых}} \frac{V_p}{V_p + V_k} = p_0 \left(\frac{V_p}{V_p + V_k} \right)^2 + \alpha_1 \frac{V_B}{V_p} p_{\text{вых}} \left[\frac{V_p}{V_p + V_k} + \left(\frac{V_p}{V_p + V_k} \right)^2 \right].$$

После откачки n циклов можно получить следующее выражение:

$$p_n = p_0 \frac{1}{[1 + (V_k/V_p)]^n} + \sum_{m=1}^n \alpha_1 \frac{V_B}{V_p} p_{\text{вых}} \frac{1}{[1 + (V_k/V_p)]^m}. \quad (4.14)$$

Здесь первое слагаемое при $n \rightarrow \infty$ стремится к нулю, второе может быть подсчитано по формуле для суммы бесконечно убывающей геометрической прогрессии:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{[1 + (V_k/V_p)]^m} = \frac{V_p}{V_k}.$$

При $n \rightarrow \infty$ (4.14) можно представить в более простом виде:

$$p_{\text{пр}} = \alpha_1 \frac{V_B}{V_k} p_{\text{вых}}.$$

Из этого выражения видно, что предельное давление определяется отношением объема вредного пространства к объему рабочей камеры насоса, давлением выхлопа и коэффициентом α_1 , учитывающим газовыделение насоса и прорыв газов из камеры сжатия в камеру всасывания насоса. Общий газовый поток самого насоса состоит из газовыделения основных деталей, выделения газов, растворенных в рабочей жидкости, упругости паров рабочей жидкости, натеканий через соединения в корпусе насоса. Предельное давление объемной откачки можно улучшить уменьшая общий обратный поток из насоса. Этого можно добиться применяя ловушки, предотвращающие проникновение паров рабочей жидкости насоса в откачиваемый объект, или последовательно соединяя две ступени откачки для уменьшения прорыва газов из камеры сжатия в камеру всасывания.

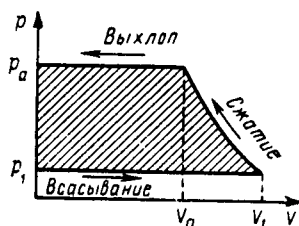


Рис. 4.7. pV -диаграмма объемных насосов

Потребляемая вращательным насосом мощность W расходуется на сжатие откачиваемого газа до выхлопного давления (полезная мощность $W_{\text{п}}$) и на преодоление сил трения (мощность потерь $W_{\text{тр}}$): $W = W_{\text{п}} + W_{\text{тр}}$. Диаграмма работы насоса в координатах p, V , представленная на рис. 4.7, определяет работу единичного цикла сжатия. Как известно из термодинамики, в случае политропического процесса работа сжатия

$$A' = p_1 V_1 \frac{1}{m-1} \left[\left(\frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]; \quad (4.15)$$

здесь V_1 — наибольший объем рабочей камеры насоса; m — показатель политропы; p_1 и p_a — давления всасывания и выхлопа.

Работа одного цикла сжатия (заштрихованная область на рисунке)

$$A = A' + p_a V_a - p_1 V_1, \quad (4.16)$$

где V_a — объем рабочей камеры насоса в момент достижения выхлопного давления p_a . Так как для политропического процесса справедливо соотношение $p_a V_a^m = p_1 V_1^m$, то

$$p_a V_a - p_1 V_1 = p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (4.17)$$

Подставляя выражения (4.15) и (4.17) в (4.16), получим

$$A = p_1 V_1 \frac{m}{m-1} \left[\left(\frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (4.18)$$

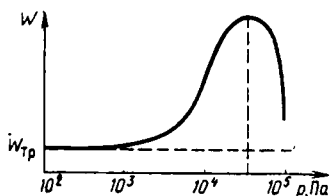


Рис. 4.8. Зависимость потребляемой мощности от давления

Так как полезная мощность, потребляемая насосом,

$$W_n = A/t_{\text{ц}} = nA,$$

где $t_{\text{ц}} = 1/n$ — время цикла, то, воспользовавшись выражением для A , будем иметь

$$W_n = nV_1 p_1 \frac{m}{m-1} \left[\left(\frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right].$$

Так как $S_r = V_1 n$, можно записать

$$W_n = S_r p_1 \frac{m}{m-1} \left[\left(\frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (4.19)$$

Продифференцируем (4.19) по p_1 и приравняем нулю полученное выражение:

$$\frac{\partial W_n}{\partial p_1} = S_r \frac{m}{m-1} \left(p_a^{\frac{m-1}{m}} \frac{1}{m} p_1^{\frac{1-m}{m}} - 1 \right) = 0. \quad (4.20)$$

Из анализа (4.19) и (4.20) следует, что $W_n = 0$ при $p_1 = 0$ и $p_1 = p_a$, а максимальная потребляемая мощность наблюдается при

$$p_1 = p_a / m^{\frac{m}{m-1}}.$$

График зависимости потребляемой мощности от давления показан на рис. 4.8. Для $m = 1, 2$ и $p_a = 10^5$ Па максимум потребляемой мощности соответствует $3,3 \cdot 10^4$ Па. Для низких давлений (менее 10^3 Па) вся потребляемая мощность является мощностью потерь на трение $W_{\text{тр}}$. При высоких давлениях ($\sim 10^5$ Па) потребляемая мощность снижается, так как уменьшается требуемая степень сжатия газа.

§ 4.4. Конструкция объемных насосов

Объемные насосы в зависимости от выбора конструктивной схемы делятся на поршневые, жидкостно-кольцевые и ротационные.

В *поршневых* откачка осуществляется за счет периодического изменения объема цилиндра. Цилиндры могут быть простого и двойного действия с водяным или воздушным охлаждением. Скорость движения поршня обычно не превышает 1 м/с. Обычные поршневые насосы с самодействующими клапанами имеют предельное давление $4 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4$ Па. Насосы с золотниковым распределением имеют более низкое предельное давление: $3 \cdot 10^2$ Па для одноступенчатых и 10^1 Па для двухступенчатых конструкций. Улучшение предельного давления достигается перепуском газа из мертвого про-

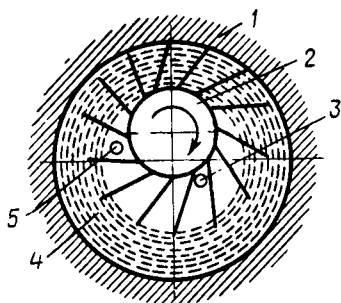


Рис. 4.9. Схема жидкостно-кольцевого насоса

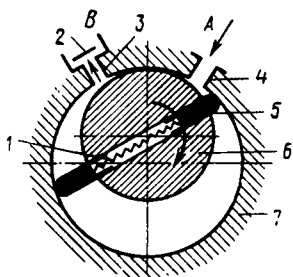


Рис. 4.10. Схема пластинчато-роторного насоса

странства в конце хода поршня во вторую полость цилиндра, в которой заканчивается процесс всасывания.

Быстрота действия современных поршневых насосов составляет 10...4000 л/с. Насосы обычно начинают работать от атмосферного давления.

Недостатками поршневых насосов являются неравномерность процесса откачки, неполная уравновешенность, большие потери на трение ~ 200 Вт/(л/с) и большая удельная масса 10...20 кг/(л/с).

Жидкостно-кольцевые насосы или насосы с жидкостным поршнем (рис. 4.9) имеют в цилиндрическом корпусе 1 эксцентрично расположенное рабочее колесо 2 с неподвижно закрепленными лопатками. Находящаяся внутри корпуса жидкость во время вращения под действием центробежных сил прижимается к стенкам корпуса и образует жидкостное кольцо 4. Между жидкостным кольцом и лопатками насоса образуются отдельные ячейки неодинакового размера. Вначале их объем увеличивается и газ через всасывающее отверстие 3 в торцевой крышке поступает в насос. Затем объем ячеек уменьшается и сжатый газ через выхлопное отверстие 5 удаляется из насоса.

В качестве рабочей жидкости для откачки смеси воздуха с водяным паром используется вода, для откачки хлора — концентрированная серная кислота и т. д. По конструкции и условиям эксплуатации эти насосы проще поршневых, так как не имеют клапанов и распределительных устройств.

Предельное давление таких насосов определяется давлением насыщенных паров рабочей жидкости. Водокольцевые насосы имеют предельное давление $(2 \dots 3) \cdot 10^3$ Па. Насосы могут работать от атмосферного давления. В компрессорном режиме обеспечивают давление до $2 \cdot 10^5$ Па. Быстрота действия лежит в пределах от 25 до 500 л/с.

Недостатком жидкостно-кольцевых насосов является довольно

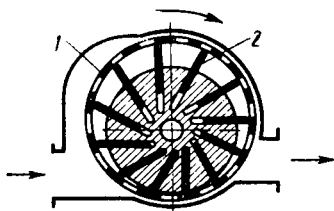


Рис. 4.11. Схема многопластинчатого роторного насоса

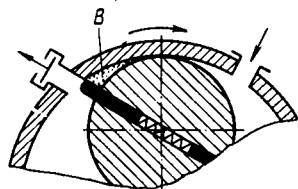


Рис. 4.12. Вредное пространство пластинчато-роторного насоса

большой удельный расход мощности ~ 200 Вт/(л/с) из-за необходимости перемещения жидкости, находящейся в насосе. Удельная масса насосов около 10 кг/(л/с).

Ротационные вакуумные насосы имеют несколько конструктивных модификаций. Пластинчато-роторный насос (рис. 4.10) содержит цилиндрический корпус 7 с впускным 4 и выхлопным 3 патрубками и эксцентрично расположенный ротор 6, в пазах которого установлены пластины 5. Под действием центробежной силы пластины прижимаются к корпусу, обеспечивая изменение объема рабочей камеры насоса. Насосы с малой быстротой действия (~ 1 л/с) работают в масляной ванне, обеспечивающей герметизацию соединений насоса и снижение потерь на трение. Для предотвращения заполнения маслом рабочей камеры служит клапан 2. Начальное прижатие пластин к поверхности статора осуществляется пружиной 1.

Многопластинчатые насосы с быстротой откачки до 10^3 л/с выполняются по схеме рис. 4.11 с большим числом пластин. В этих насосах нет масляной ванны, а для уменьшения потерь на трение используются беговые кольца 1, которые приводятся во вращение пластинами 2. Отверстия в беговых кольцах обеспечивают прохождение откачиваемого газа. В некоторых конструкциях, имеющих пластины из антифрикционных материалов, можно обойтись без беговых колец.

Предельное давление таких насосов определяется кроме газовой выделением материалов насоса объемом вредного пространства и давлением насыщенных паров масла.

Вредное пространство насоса обозначено на рис. 4.12 буквой В. В пластинчато-роторных насосах (см. рис. 4.10) объем вредного пространства частично заполняется рабочей жидкостью. В корпусе насоса, выполненного по схеме рис. 4.11, из объема вредного пространства делается перепускной канал в одну из рабочих камер, не соединяющихся с откачиваемым объектом.

Без учета давления насыщенных паров рабочей жидкости предельные давления насосов составляют 1 Па для схемы рис. 4.10 и $2 \cdot 10^3$ Па для схемы рис. 4.11.

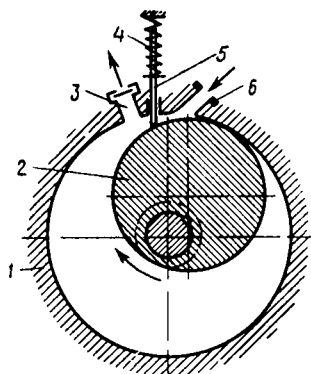


Рис. 4.13. Пластинчато-статорный насос

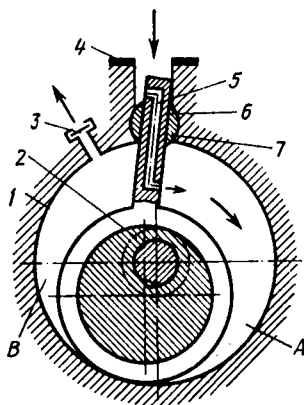


Рис. 4.14. Золотниковый насос

Предельное давление двухступенчатых пластинчато-роторных насосов составляет 10^{-3} Па.

Удельная масса таких насосов от 10 до 30 кг/(л/с), удельный расход мощности от 0,1 до 0,3 кВт/(л/с), причем меньшие значения имеют многопластинчатые роторные насосы.

Ротационные насосы с катящимся ротором бывают двух видов: пластинчато-статорные и золотниковые насосы.

Пластинчато-статорный насос (рис. 4.13) состоит из следующих основных элементов: корпуса 1, эксцентричного ротора 2, выпускного патрубка 3, пластины 5, пружины 4, входного патрубка 6. Рабочее пространство насоса образуется между эксцентрично установленным ротором и корпусом насоса. При вращении по часовой стрелке за первый оборот ротора газ всасывается из откачиваемого объекта, а за второй происходит сжатие и выхлоп газа. Пластина под воздействием пружины герметично разделяет области всасывания и сжатия откачиваемого газа.

Золотниковый насос (рис. 4.14) состоит из корпуса 1, эксцентрично установленного ротора 2, золотника 6, выпускного патрубка и обратного клапана 3, шарнира 7 и входного патрубка 4. Газ из откачиваемого объекта через входной патрубок и отверстия 5 в золотнике поступает в камеру всасывания А, увеличивающуюся при вращении ротора по часовой стрелке. В это же время объем камеры В уменьшается и находящийся в ней газ сжимается и выталкивается через выхлопной патрубок.

Пластинчато-статорный и золотниковый насосы работают в масляной ванне, так же как и пластинчато-роторный насос. Характеристики этих насосов примерно одинаковы, но золотниковые насосы имеют большие быстроты откачки. Быстроты действия этих насосов в зависимости от давления показаны на рис. 4.15 и могут быть опи-

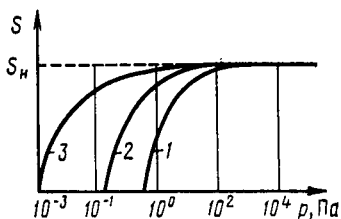


Рис. 4.15. Зависимость быстроты действия от входного давления для ротационных масляных насосов

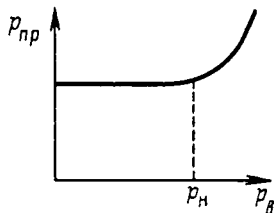


Рис. 4.16. Зависимость предельного давления от выпускного

саны формулой (4.12). Кривая 1 соответствует работе одноступенчатого насоса, кривая 2 — двухступенчатого без ловушки, кривая 3 — двухступенчатого с ловушкой.

Давление запуска и выпускное давление насосов обычно равны атмосферному, но при герметичной перекачке газов они могут изменяться в широких пределах. Зависимость их предельного давления от выпускного показаны на рис. 4.16. Наибольшее выпускное давление $p_n \approx 2 \cdot 10^5$ Па. При выпускных давлениях, больших p_n , нарушается герметичность масляного уплотнения в зазорах насоса и наблюдается резкое ухудшение предельного давления. При выпускном давлении, меньшем p_n , предельное давление практически не зависит от выпускного.

В качестве рабочей жидкости насосов обычно применяются вакуумные масла, полученные из обычных смазочных материалов отгонкой как легких, так и тяжелых фракций. Характеристики вакуумных масел отечественного производства приведены в табл. П.1. Температура вспышки масел должна быть не ниже 200°C , что характеризует отсутствие в масле легкоокисляющихся фракций.

Полусухое трение, существующее в насосах, сопровождается разогревом отдельных соприкасающихся микронеровностей вплоть до температуры плавления металла. В таких условиях наблюдается крекинг масла с образованием легких углеводородов, ухудшающих предельное давление насоса.

Характеристики выпускаемых промышленностью ротационных вакуумных насосов различных типов приведены в табл. П.2 и на рис. П.1.

Для работы с большой быстротой действия при малых степенях сжатия удобны ротационные вакуумные насосы с обкатываемыми профилями. Вращение роторов обеспечивается синхронизирующей передачей. Профили роторов в этих насосах таковы, что при взаимной обкатке они не соприкасаются. В некоторых конструкциях маслозаполненных насосов синхронизирующая передача отсутствует и роторы соприкасаются. Наиболее распространены двухроторные конструкции.

По способу сжатия газа ротационные вакуумные насосы с обкатываемыми профилями можно разделить на насосы с внешним, частичным внутренним и внутренним сжатием. В насосах с *внешним* сжатием газ сжимается только в процессе нагнетания. К таким насосам относятся двухроторные насосы (насосы Рутса), имеющие роторы с лемнискатными профилями (рис. 4.17). За один оборот каждый из роторов дважды перебрасывает заштрихованный объем газа из области высокого вакуума в область предварительного разрежения. Роторы вращаются в разные стороны. Синхронность их вращения обеспечивается зубчатой передачей с передаточным числом, равным единице (обозначена на рисунке пунктиром).

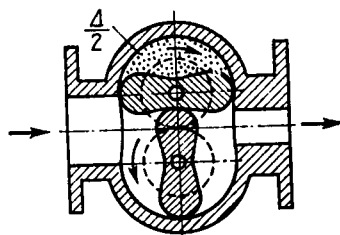


Рис. 4.17. Схема двухроторного насоса с лемнискатными профилями (насос Рутса)

Объем рабочей камеры насоса

$$V_k = 2\pi R^2 l K_\lambda, \quad (4.21)$$

где R — максимальный радиус ротора; l — длина ротора; $K_\lambda = \Delta/\pi R^2$; Δ — площадь впадин в площади круга, описанного вокруг ротора.

Умножая объем рабочей камеры насоса V_k (4.21) на частоту вращения роторов n , можно определить геометрическую быстроту откачки насоса S_r . Обратный поток газа в этих насосах в основном определяется технологическими зазорами в роторном механизме:

$$Q_{об} = U_3 (p_{вых} - p_{вх}), \quad (4.22)$$

U_3 — проводимость зазоров в роторном механизме.

Считая зазоры тонкими щелями, запишем проводимость (для воздуха) (3.58) при молекулярном режиме (m^3/c): $U_3 = 116 A$, где $A = l(\delta_p + 2\delta_{рк}) + 4R(\delta_{т1} + \delta_{т2})$ — суммарная площадь зазоров, m^2 . Здесь δ_p — зазор между роторами; $\delta_{рк}$ — зазор между роторами и корпусом; $\delta_{т1}$ и $\delta_{т2}$ — торцевые зазоры между роторами и крышками. Величина зазоров между ротором и статором обычно равна $0,004R$, а между роторами и торцевыми крышками — $0,006R$.

Обратный поток газа в насосе можно также выразить через предельное давление и максимальную быстроту действия насоса: $Q_{об} = S_{max} p_{пр}$. Решая это уравнение совместно с (4.22) при $p_{вх} = p_{пр}$ найдем коэффициент компрессии насоса: $K = p_{вых}/p_{пр} = 1 + S_{max}/U_3$.

Значение коэффициента компрессии зависит от проводимости зазоров, возрастающей с повышением давления. В высоком вакууме $K \approx 50$, а при атмосферном давлении $\sim 1,5$. В связи с этим зависимость быстроты действия от давления, представленная на рис. 4.18, имеет характерный спад в области высоких давлений. Нормальная

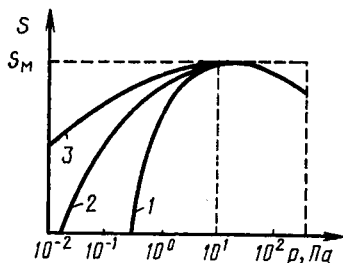


Рис. 4.18. Характеристика $S(p)$ двухроторного насоса: 1 — одноступенчатого; 2 — двухступенчатого; 3 — двухступенчатого с ловушкой

работа насоса такого типа возможна только при наличии насоса предварительного разрежения.

Предельное давление одноступенчатых насосов $5 \cdot 10^{-1}$ Па, двухступенчатых — $4 \cdot 10^{-2}$ Па с учетом давления насыщенных паров вакуумного масла, применяемого для смазки подшипников. При работе с ловушкой предельное давление составляет 10^{-3} Па. Наибольшее выпускное давление одноступенчатых насосов от 10^2 до 10^3 Па.

Двухроторные насосы имеют при тех же габаритах значительно большие быстроты действия, чем пластинчатые и насосы с катящимся ротором, так как из-за отсутствия трения между ротором и статором можно значительно увеличить их частоту вращения. Быстрота действия современных двухроторных насосов лежит в пределах от 5 до 5000 л/с. Удельные характеристики насоса 0,5...3 кг/(л/с) и 6...30 Вт/(л/с), причем меньшие значения удельной мощности даны для насосов с большей быстротой действия.

Характеристики двухроторных насосов различных типов приведены на рис. П.1. и в табл. П.3.

Работа объемных вакуумных насосов может сопровождаться рядом нежелательных явлений: проникновением паров рабочих жидкостей из насоса в откачиваемый объект; загрязнением насоса откачиваемыми веществами с высоким давлением насыщенных паров; потерей рабочей жидкости через выхлопной патрубок; утечкой откачиваемого газа и т. д.

Для ограничения этих явлений служит специальное сервисное оборудование, которым в случае необходимости снабжаются объемные насосы: ловушки, влагопоглотители, натекатели, конденсаторы, фильтры, уплотнители и т. д.

При высоких давлениях (более 10^2 Па) обратный поток паров рабочей жидкости задерживается встречным потоком откачиваемого газа и в применении защитных устройств не возникает необходимости. При более низких давлениях, когда длина свободного пути молекул газа становится больше диаметра входного патрубка насоса, пары рабочей жидкости могут двигаться навстречу основному потоку и проникать в откачиваемый объект. Если температура насоса выше, чем температура откачиваемого объекта, то обратный поток будет существовать до тех пор, пока вся рабочая жидкость насоса не переместится в откачиваемый объект. Для защиты откачиваемого объекта от паров рабочей жидкости используются ловушки — устройства для парциальной откачки паров рабочих жидкостей.

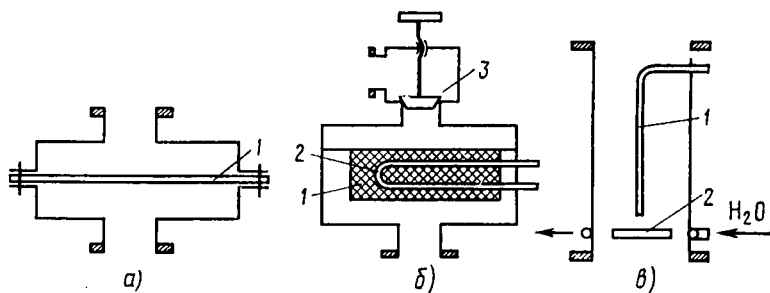


Рис. 4.19. Схемы ловушек для паров рабочих жидкостей объемных насосов:

а — механическая ловушка; *б* — адсорбционная ловушка; *в* — ионная ловушка

К ловушкам предъявляются следующие основные требования: максимальное защитное действие на заданном сроке службы и минимальное сопротивление основному потоку откачиваемого газа. В качестве дополнительных требований можно назвать возможность регенерации, надежность, простоту и технологичность конструкции, удобство эксплуатации.

Механические ловушки (рис. 4.19, *а*) для объемных насосов представляют собой устройства, препятствующие прямому пролету паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объект. Для получения заметного защитного действия в момент останова насоса в ловушке должны выполняться условия молекулярного режима течения газа вплоть до атмосферного давления, что соответствует наибольшему расстоянию между элементами ловушки 0,1 мкм. Такие размеры можно обеспечить только в пористых элементах 1. Наиболее эффективно применение элементов из пористого стекла, стекловолоконистых материалов, пористых меди и нержавеющей стали. Наиболее часто используемые материалы приведены в табл. 4.1. Габариты ловушек зависят от удельной проводимости пористых материалов.

Таблица 4.1

Характеристики пористых материалов

Параметры	Материал			
	тонко-пористое стекло	широко-пористое стекло	нержавеющая сталь	медные фильтры
Размеры пор, мкм	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$
Удельная проводимость, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$	10^{-10}	10^{-8}	$2 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}

Поглощение паров масла в ловушках осуществляется адсорбцией на стенках капиллярных каналов. Период непрерывной работы ловушки составляет несколько сотен часов, по истечении которых элемент должен быть заменен, очищен продувкой атмосферным воздухом или прогрет до высоких температур ($\sim 500^\circ\text{C}$).

Термостатирование ловушек во время их работы осуществляется проточной водой. Снижение температуры ловушек дополнительно повышает их защитное действие, но несколько снижает удельную проводимость.

Увеличения срока службы ловушек можно достигнуть добавляя в пористые фильтры адсорбционные материалы: активные угли, цеолиты с размерами пор $\sim 9 \text{ \AA}$, активную окись алюминия. Ловушки с адсорбентом (рис. 4.19, б) нельзя подвергать воздействию атмосферного воздуха, так как они могут поглотить большое количество атмосферной воды, которая затем будет выделяться во время работы насоса. Для удаления поглощенных в адсорбционном элементе 1 масла и воды ловушку прогревают нагревателем 2 до $300 \dots 500^\circ\text{C}$. Клапан 3 помещают в одном корпусе с ловушкой и закрывают во время обезгаживания адсорбента, защищая от загрязнения вакуумную систему.

В ионных ловушках (рис. 4.19, в) корпус, имеющий форму цилиндра, служит заземленным катодом для холодного разряда. Анодом является стержень 1, расположенный вдоль оси цилиндра. Разряд горит при напряжении на аноде $\sim 3 \text{ кВ}$ и наличии осевого магнитного поля, создаваемого внешними магнитами. Электроны, эмиттируемые катодом, движутся по удлиненной траектории к аноду, ионизируя остаточный газ. Положительные ионы, бомбардирующие поверхность корпуса, разрушают поверхностную пленку масла. Это приводит к выделению водорода и полимеризации углеводородов в твердые вещества. Охлаждение корпуса и защитного экрана 2 осуществляется водой. Такая ловушка может уменьшить парциальное давление паров масла в $10 \dots 100$ раз.

При откачке вакуумных систем с большим количеством паров воды или других растворителей с высокими значениями давления насыщенного пара при комнатной температуре возникает опасность загрязнения насоса откачиваемыми веществами. В этом случае насосы снабжаются газобалластным устройством, позволяющим снизить коэффициент компрессии откачиваемого пара в насосе и предотвратить его конденсацию в рабочей камере насоса. В пластинчатых насосах с катящимся ротором используется в качестве газобалластного устройства натекаТЕЛЬ для подачи атмосферного воздуха в рабочую камеру.

Пример конструктивного решения устройства для напуска балластного газа показан на рис. 4.20. В корпусе насоса со стороны торцевой части ротора делается отверстие А в атмосферу, расположенное таким образом, что при вращении ротора оно открывается только во время сжатия в камере насоса. При всасывании торцевая

часть ротора закрывает отверстие, предохраняя камеру от заполнения атмосферным воздухом.

Для регулирования количества выпускаемого балластного газа отверстие А соединяется с атмосферной через натекатель. Если натекатель закрыт, то насос работает в обычном режиме. Использование газобалластного устройства ухудшает предельное давление насоса из-за увеличения перетечек газа из камеры сжатия в камеру разрежения.

Для защиты от пылевых частиц на входе в насос можно устанавливать впускной фильтр из шерстяной ткани, который задерживает пылевые частицы размером более 10 мкм.

Потеря рабочей жидкости через выхлопной патрубок уменьшается брызгоуловителями, устанавливаемыми в насосе. При откачке больших газовых потоков брызгоуловители могут оказаться неэффективными. В этом случае устанавливают внешние брызгоуловители и фильтры для поглощения масляного тумана.

При откачке кислорода необходимо пользоваться негорючими маслами или другими невоспламеняющимися жидкостями, например фосфатными эфирами. Для радиационноопасных помещений разработаны масла, стойкие к радиации.

Для откачки ценных и радиоактивных газов требуются насосы с герметичным уплотнением всех элементов на выходе из насоса. В таких конструкциях вакуумные уплотнения установлены в масляналивном патрубке, сливных пробках, смотровом стекле, а корпус насоса проверяется на герметичность по всем правилам, предусмотренным для высоковакуумных систем.

§ 4.5. Молекулярная откачка

Удаление газа из вакуумной системы с помощью движущихся поверхностей называется молекулярной откачкой. Существуют две схемы молекулярной откачки.

Первая (рис. 4.21) представляет собой откачку через канал, одна из стенок которого совершает относительное перемещение со скоростью v_p параллельно оси канала. Молекулы газа, находящиеся в канале, соударяются с движущейся поверхностью, получая приращение количества движения в направлении насоса предварительного разрежения. При этом создается перепад давлений: $p_2 > p_1$.

Максимальная быстрота действия, которая может быть получена в такой схеме, пропорциональна скорости стенки v_p :

$$S_{\max} = \gamma F_k v_p, \quad (4.23)$$

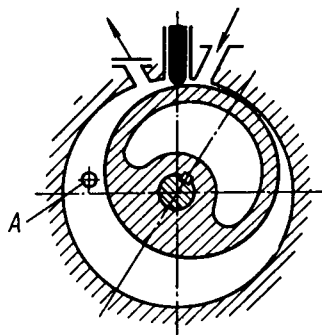


Рис. 4.20. Схема газобалластного насоса

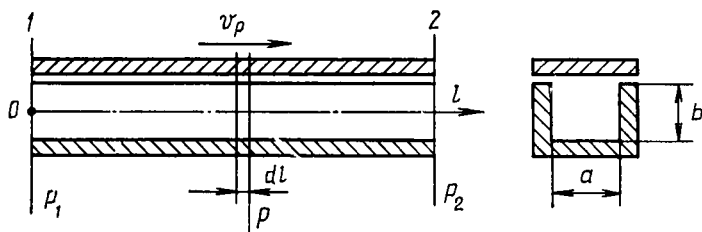


Рис. 4.21. Схема молекулярной откачки при одинаковых направлениях движения пластины и газового потока

где F_k — площадь поперечного сечения канала; γ — коэффициент, учитывающий соотношения движущейся и неподвижной частей периметра канала.

Принимая число соударений молекул с движущимися и неподвижными поверхностями одинаковым, определим долю молекул, непрерывно получающих приращение скорости, в виде

$$\gamma = f_d / (f_d + f_n), \quad (4.24)$$

где f_d и f_n — движущаяся и неподвижная части периметра поперечного сечения канала. Для прямоугольного канала с $a=2,5$ см, $b=1$ см и $v_p=165$ м/с, согласно (4.23) и (4.24), получим $S_{\max}=23$ л/с.

Дифференциальное уравнение течения газа через канал постоянного поперечного сечения в установившемся режиме ($Q=\text{const}$) можно записать в виде разности прямого и обратного потоков:

$$Q = S_{\max} p - C \frac{dp}{dl}, \quad (4.25)$$

где $C = U_k l_k$; U_k — проводимость канала с неподвижными сторонами; l_k — длина канала.

Перепишем уравнение (4.25) в новых обозначениях:

$$\frac{dp}{dl} + Ap - B = 0, \quad (4.26)$$

$$A = -S_{\max}/C; \quad B = -Q/C.$$

С учетом граничного условия $p=p_1$ при $l=0$ решение (4.26) может быть записано в виде

$$p = \frac{B}{A} (1 - e^{-At}) + p_1 e^{-At}.$$

Тогда в конце канала при $l=l_k$ давление

$$p_2 = \frac{Q}{S_{\max}} (1 - \exp(S_{\max}/U_k)) + p_1 \exp(S_{\max}/U_k).$$

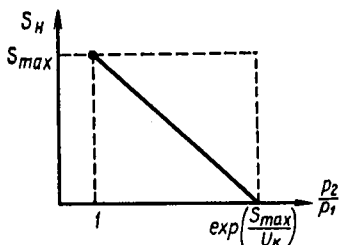


Рис. 4.22. Зависимость быстроты действия насоса от коэффициента компрессии

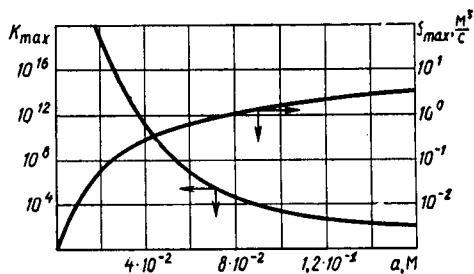


Рис. 4.23. Зависимость максимальных быстроты действия и коэффициента компрессии от стороны канала a при $a=b$, $l=1$ м, $v_p=200$ м/с

Учитывая, что $Q=p_1 S_H$, из последнего выражения для быстроты действия получим следующую формулу:

$$S_H = S_{\max} \frac{p_2/p_1 - \exp(S_{\max}/U_K)}{1 - \exp(S_{\max}/U_K)}. \quad (4.27)$$

Из (4.27) следует линейная зависимость между быстротой действия и коэффициентом компрессии p_2/p_1 , показанная на рис. 4.22. При равенстве давлений $p_1=p_2$ быстрота действия максимальна: $S_H=S_{\max}$, а при $S_H=0$ и $p_1=p_{\text{пр}}$ имеет место наибольший коэффициент компрессии

$$K_{\max} = p_b/p_{\text{пр}} = \exp(S_{\max}/U_K). \quad (4.28)$$

В связи с тем, что проводимость каналов U_K при молекулярном режиме течения пропорциональна $\sqrt{T/M}$ максимальный коэффициент компрессии возрастает с увеличением молекулярной массы и снижением температуры газа.

Зависимость K_{\max} и S_{\max} от стороны канала a при $a=b$, $v_p=200$ м/с, $l=1$ м показана на рис. 4.23.

Для прямоугольного канала $a=2,5$ см, $b=1$ см при $l_K=55$ см и $v_p=165$ м/с по формуле (4.28) максимальное значение коэффициента компрессии $p_b/p_{\text{пр}}=10^{10}$. Таким образом, данная схема молекулярной откачки удобна для получения больших коэффициентов компрессии при малых быстротах откачки.

При увеличении молекулярной массы откачиваемого газа K_{\max} возрастает, а S_{\max} остается без изменения. Таким образом, насос более эффективно откачивает тяжелые газы.

Вторая схема молекулярной откачки (рис. 4.24, а) использует для удаления газов зависимость проводимости наклонного канала, движущегося перпендикулярно газовому потоку со скоростью v_p от направления течения газа. Для упрощения задачи примем, что пластину с наклонным каналом с обеих сторон бомбардируют нормально по отношению к поверхности пластины потоки молекул газа q_1

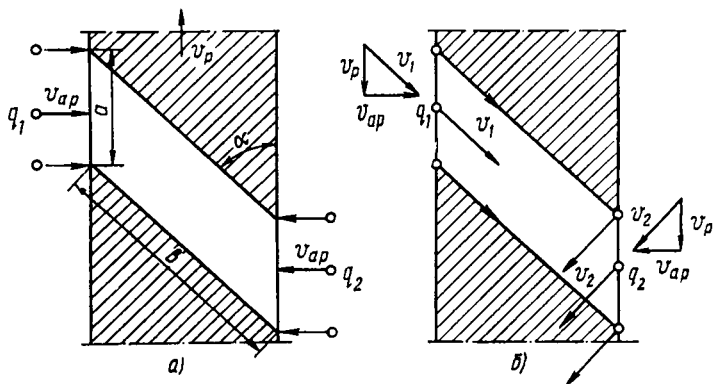


Рис. 4.24. Схема откачки при взаимно перпендикулярном перемещении пластины и газового потока

и q_2 . Остановив пластину и сложив вектор относительной скорости молекул v_p с векторами тепловых скоростей молекул v_p , получим измененное направление движения молекул (рис. 4.24, б). Поток q_1 при $\text{tg } \alpha = v_{ap}/v_p$ входит по оси канала, а поток q_2 — перпендикулярно оси. Это приводит к тому, что проводимости канала для потоков q_1 и q_2 различны. Приблизительно можно принять, что для потока q_1 канал имеет форму трубы, а для потока q_2 — форму трубы с поворотом на 90° .

Для установившегося режима течения газа

$$Q = S_n p_1 = U_{12} p_1 - U_{21} p_2, \quad (4.29)$$

где U_{12} и U_{21} — проводимости канала для потоков q_1 и q_2 соответственно. Значение указанных проводимостей можно определить пользуясь справочными данными о проводимостях прямых труб и труб с коленом или непосредственным математическим моделированием данной задачи методом Монте-Карло. На рис. 4.25 в безразмерной форме приведены результаты определения вероятности прохождения канала молекулами газа, полученные математическим моделированием для каналов с соотношением сторон $a/b = 1$.

Из (4.29) следует выражение для быстроты действия

$$S_n = U_{12} - U_{21} \frac{p_2}{p_1}$$

Зависимость быстроты действия насоса от коэффициента компрессии аналогична такой же зависимости для первой схемы.

Максимальная быстрота действия при $p_2/p_1 = 1$ составляет

$$S_{\text{max}} = U_{12} (1 - U_{21}/U_{12}) = U_{12} (1 - P_{21}/P_{12}). \quad (4.30)$$

Здесь P_{12} и P_{21} — вероятности перехода молекул через канал в прямом и обратном направлениях, пропорциональные соответствующим проводимостям.

Наибольший коэффициент компрессии наблюдается при $S_n=0$. Если $p_1=p_{\text{пр}}$, а $p_2=p_{\text{в}}$, то из (4.29) $K_{\text{max}}=p_{\text{в}}/p_{\text{пр}}=U_{12}/U_{21}=P_{12}/P_{21}$.

Величина $p_{\text{в}}/p_{\text{пр}}$ для одной ступени невелика (обычно 2...4), поэтому данная схема более удобна для получения больших быстродействий. Повышение коэффициента компрессии достигается последовательным соединением нескольких ступеней откачки.

Быстрота откачки насоса слабо зависит от молекулярной массы (рис. 4.26), особенно в рабочих режимах. Зависимость K_{max} и S_{max} от размера канала a показана на рис. 4.27.

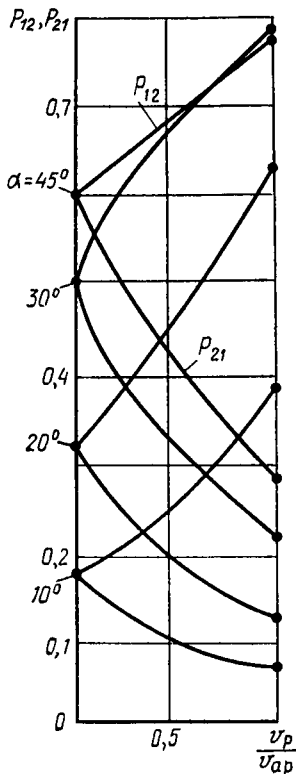


Рис. 4.25. Вероятности прохождения молекулами канала со стороны более высокого вакуума P_{12} и со стороны низкого вакуума P_{21} в зависимости от относительной скорости v_p/v_{ap} и угла наклона паза α

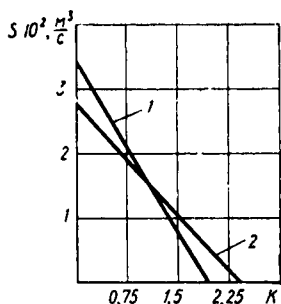


Рис. 4.26. Зависимость быстроты откачки насоса от коэффициента компрессии K ($a=b=2 \cdot 10^{-2}$ м, $\alpha=30^\circ$, $v_p=200$ м/с):
1 — N_2 ; 2 — CO_2

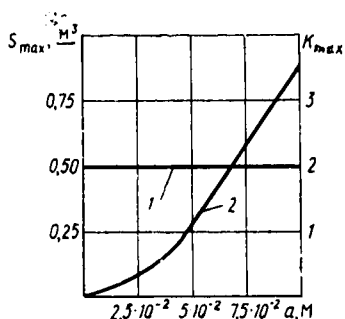


Рис. 4.27. Зависимость максимальной быстроты откачки и максимального коэффициента компрессии насоса от размера канала a ($a=b$; $\alpha=30^\circ$; $v_p/v_{ap}=0.5$):
1 — K_{max} ; 2 — S_{max}

§ 4.6. Конструкция молекулярных насосов

Молекулярные насосы с одинаковым направлением движения газа и стенки канала имеют много конструктивных разновидностей, часть из которых показана на рис. 4.28.

Насос (рис. 4.28, а) имеет в статоре 3 набор цилиндрических канавок, входные и выходные отверстия в которых разделены перегородкой 1. Ротор 2 вращается с большой частотой так, что его линейная скорость близка к тепловой скорости молекул.

Спиральный паз 1 на поверхности статора 2 и цилиндрическая поверхность ротора 3 образуют рабочий канал (схема на рис. 4.28, б). Спиральные канавки на торцевых поверхностях статора 1, отстоящие на минимальном расстоянии от вращающегося диска 2, используются для молекулярной откачки в схеме рис. 4.28, в. Через зазор между статором и ротором происходит возврат газа из камеры сжатия в камеру всасывания, что ухудшает реальные характеристики насосов. Нормальная работа таких насосов возможна при зазоре между ротором и статором, не превышающем 0,1 мм.

Такие насосы применяются в качестве ступеней высокого давления при совместной работе с насосами, имеющими взаимно перпендикулярное перемещение газа и рабочих поверхностей, а также при откачке газов с большой молекулярной массой.

Проникновение паров масел, применяемых для смазки подшипниковых узлов, в откачиваемый объект во время работы насоса очень мало, но сильно возрастает при остановке насоса.

Быстрота действия насосов прямо пропорциональна частоте вращения ротора, которая в современных насосах может достигать 10 ... 40 тыс. об/мин. Максимальная быстрота действия обычно не превышает 100 л/с из-за малого поперечного сечения каналов. Предельное давление 10^{-5} Па при коэффициенте компрессии $10^5 \dots 10^6$.

Молекулярные насосы с взаимно перпендикулярным движением рабочих поверхностей и потока откачиваемого газа получили широкое распространение. Конструкции турбомолекулярного насоса, использующие этот принцип, классифицируются по расположению вала ротора — горизонтальные или вертикальные; по устройству и форме рабочих органов — цилиндрические, конусные, дис-

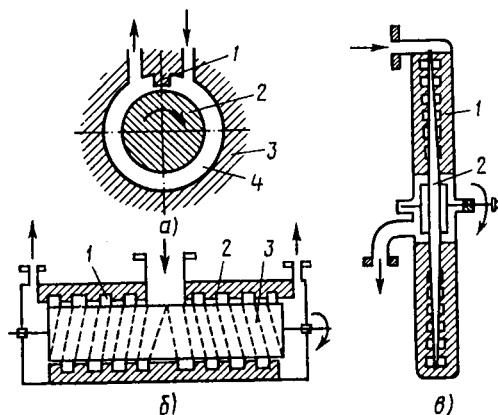


Рис. 4.28. Схемы молекулярных насосов

ковые с радиальным потоком, дисковые с осевым потоком, барабанные. Большое влияние на характеристики насоса оказывает конструкция опорных узлов: на смазываемых подшипниках качения, на магнитных опорах или газовой подушке.

Схемы насосов с горизонтальным и вертикальным расположением вала ротора показаны на рис. 4.29, а, б. В корпусе 2 установлены неподвижные статорные колеса 4, между которыми вращаются колеса 3, закрепленные на роторе 1. Роторные колеса выполняются в виде дисков с прорезями. В статорных колесах имеются зеркально расположенные прорези такой же формы. Для удобства монтажа статорные колеса разрезаются по диаметру.

При горизонтальном положении ротора движение газа в насосе после входа во всасывающий патрубок разветвляется на два потока, которые соединяются в выхлопном патрубке.

В связи с малыми коэффициентами компрессии каждой ступени в турбомолекулярном насосе можно увеличить рабочие зазоры. При диаметре рабочих колес 200 мм осевой (между колесами) и радиальный (между корпусом и роторным колесом или ротором и статорным колесом) зазоры могут составлять 1...1,2 мм, что позволяет значительно повысить надежность их работы. Увеличение зазоров, снижая коэффициент компрессии насоса, слабо влияет на его быстроту действия.

Быстрота откачки турбомолекулярных насосов слабо зависит от рода газа. Предельное давление насосов 10^{-7} ... 10^{-8} Па. С увеличением молекулярной массы коэффициент компрессии растет за счет уменьшения перетечек через зазоры и увеличения отношения линейной скорости ротора к тепловой скорости молекул $v_p/v_{ар}$. Наибольшее выпускное давление таких насосов для воздуха 1...10 Па.

К достоинствам турбомолекулярного насоса относятся: высокая удельная быстрота действия ~ 2 л/с на 1 см² площади входного сечения; достаточно широкий диапазон рабочих давлений 10^{-6} ...10 Па; быстрый запуск насоса в течение 5...10 мин; практически безмасляный спектр остаточных газов при напуске сухого азота во время запуска и остановки насоса.

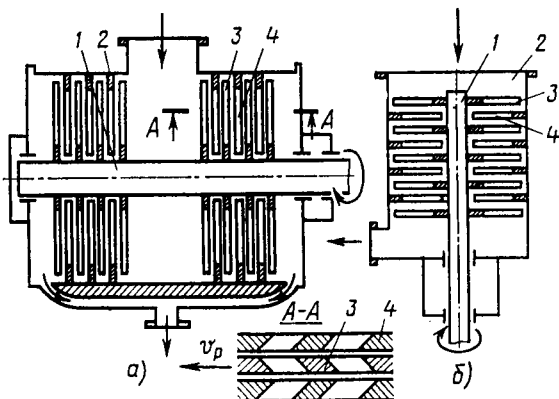


Рис. 4.29. Схемы турбомолекулярных насосов: а—с горизонтальным валом, б—с вертикальным валом

Недостатком насоса является наличие высокоскоростного ротора со смазываемыми быстро изнашивающимися подшипниками или сложными системами подвеса. Характеристики современных турбомолекулярных насосов приведены на рис. П.2 и табл. П.4.

§ 4.7. Пароструйная откачка

При пароструйной откачке (рис. 4.30) молекулы откачиваемого газа, поступающие в насос через входной патрубок 1, взаимодействуют со струей пара, имеющей звуковую или сверхзвуковую скорость, и приобретают дополнительную скорость в направлении насоса предварительного разрежения, присоединяемого к выходному патрубку 6.

В камере 3 происходит смешение паровой струи, выходящей из сопла 2, и откачиваемого газа. Запирающий канал 4 создает сопротивление обратному потоку газа, обеспечивая коэффициент компрессии насоса. Разделение откачиваемого газа и рабочего пара осуществляется в камере 5 в процессе конденсации рабочего пара на охлажденных поверхностях, после чего откачиваемый газ выходит из насоса через выходной патрубок, а сконденсировавшийся пар поступает по трубопроводу 7 в кипятильник 8, где вновь испаряется и по паропроводу 9 попадает в рабочее сопло 2, обеспечивая непрерывность процесса откачки.

Взаимодействие откачиваемого газа с паровой струей зависит от степени вакуума. При низком вакууме молекулы, находящиеся в пограничном с паровой струей слое, за счет внутреннего трения увлекают другие слои газа. Такие насосы называют эжекторными.

В области высокого вакуума все молекулы откачиваемого газа, перемещаясь за счет самодиффузии, непосредственно взаимодействуют с движущейся струей пара, а насосы, работающие в таких условиях, называют диффузионными.

Рассмотрим принцип действия эжекторного насоса.

Быстрота действия насоса при заданных значениях давлений на входе в насос p_2 и на выходе из насоса p_5 , а также производительности рабочего пара G_1 определяется по IS_3 -диаграмме рабочего пара.

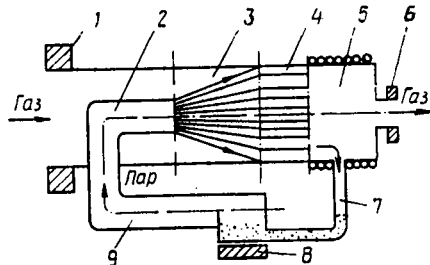


Рис. 4.30. Схема пароструйной откачки

Кривая AB на рис. 4.31, a определяет давление насыщенного пара рабочей жидкости. Из начального состояния в кипятильнике (точка 1 на кривой AB , давление p_1 , сечение 1 на схеме сопла) рабочий пар адиабатически расширяется и переходит в состояние (точка 2), соответствующее давлению p_2 струи рабочего пара в откачиваемом объ-

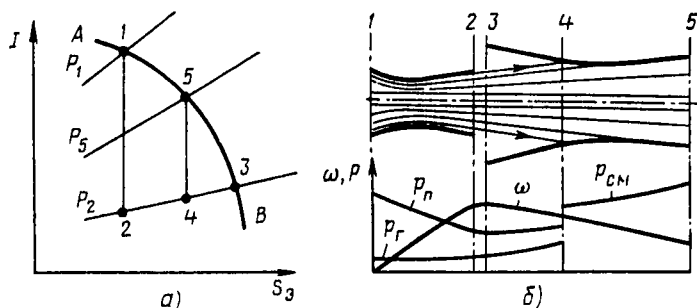


Рис. 4.31. IS_g -диаграмма-рабочего пара (а), схема и рабочие характеристики сопла эжекторного насоса (б)

екте (сечение 2). Адиабатические процессы на IS_g -диаграмме соответствуют прямым линиям, параллельным оси I . Закон сохранения энергии для адиабатического истечения газа, при котором работа расширения газа равна приращению его кинетической энергии, можно записать в виде

$$G_1(I_1 - I_2) = G_1 \omega_2^2 / 2, \quad (4.31)$$

где ω_2 — скорость паровой струи на выходе из сопла в сечении 2. Откачиваемый газ (для простоты считаем, что откачиваются пары рабочей жидкости) находится в состоянии, соответствующем точке и сечению 3. Смещение потока откачиваемого газа G_2 с паровой струей по закону сохранения энергии приведет к изменению скорости:

$$G_1 \frac{\omega_2^2}{2} = (G_1 + G_2) \frac{\omega_4^2}{2}, \quad (4.32)$$

где ω_4 — скорость смеси в сечении 4 (рис. 4.31, б).

В диффузоре, расположенном между сечениями 4 и 5, парогазовая смесь адиабатически сжимается до давления p_5 , причем точка 5, соответствующая сечению 5, должна лежать на кривой AB . Это можно использовать для нахождения точки 4 графическим построением. В процессе адиабатического сжатия кинетическая энергия струи переходит в энтальпию, что позволяет записать

$$(G_1 + G_2) \omega_4^2 / 2 = (G_1 + G_2) (I_5 - I_4), \quad (4.33)$$

где I_4 и I_5 — энтальпии в точках 4 и 5.

Из уравнений (4.31)...(4.33) можно найти выражение для теоретической скорости действия насоса:

$$S_r = \frac{G_2}{p_2} = \frac{G_1 (I_1 - I_2 - I_5 + I_4)}{p_2 (I_5 - I_4)}, \quad (4.34)$$

где ρ_2 — плотность газа в сечении 2; I_1 и I_2 — энтальпии в точках 1 и 2. Быстрота действия насоса зависит от производительности сопла и свойств рабочего пара. В эжекторных насосах она лежит в диапазоне от нескольких десятков до нескольких тысяч литров в секунду.

Максимальное выпускное давление не может быть больше p_1 — давления рабочего пара в кипятыльнике насоса, поэтому в случае паромасляного насоса оно не превышает $(1 \dots 5) \cdot 10^2$ Па, а для парортутного — $(20 \dots 40) \cdot 10^2$ Па. Увеличить максимальное выпускное давление паромасляного насоса нельзя, так как температура пара в кипятыльнике ограничивается температурой разложения масла. В парортутных насосах возможно повышение максимального выпускного давления до атмосферного, но из-за больших потерь и токсичности ртути этого обычно не делают.

Предельным остаточным давлением эжекторного насоса является давление перехода из среднего в высокий вакуум, когда происходит расширение паровой струи и нарушение оптимального режима работы. Значение предельного давления составляет $10^{-1} \dots 10^{-2}$ Па.

Размеры сопла можно найти, задаваясь значением его производительности G_1 по рабочему пару. Подставляя критическое отношение давлений

$$r_k = \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

в (3.46), получим выражение для максимальной производительности сопла

$$P_1 = V \sqrt{\frac{p_1}{V_1} \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} A_{\min}^c, \quad (4.35)$$

где p_1 — давление пара в кипятыльнике; V_1 — удельный объем пара в кипятыльнике; A_{\min}^c — минимальное сечение сопла.

Из (4.35) можно найти минимальное сечение сопла:

$$A_{\min}^c = \frac{P_1}{\sqrt{\frac{p_1}{V_1} \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}}}. \quad (4.36)$$

Выходное сечение сверхзвукового сопла A_2^c можно найти из уравнения (4.31) с учетом того, что $\omega_2 = p_1 V_2 / A_2^c$ (V_2 — удельный объем пара на выходе из сопла):

$$A_2^c = \frac{p_1 V_2}{\sqrt{2(I_1 - I_2)}}.$$

При истечении струи пара в высокий вакуум происходит ее расширение за счет тепловых скоростей молекул. При равенстве ско-

рости истечения струи и скорости звука струя выходит из сопла под углом 45° к его оси (рис. 4.32). Давление пара в струе значительно больше, чем давление откачиваемого газа. Наилучшие условия для захвата молекул откачиваемого газа обеспечиваются тогда, когда давление пара в струе соответствует среднему вакууму. При этом все молекулы откачиваемого газа проникают в паровую струю при первом соударении. При большей плотности паровой струи вероятность захвата молекул снижается.

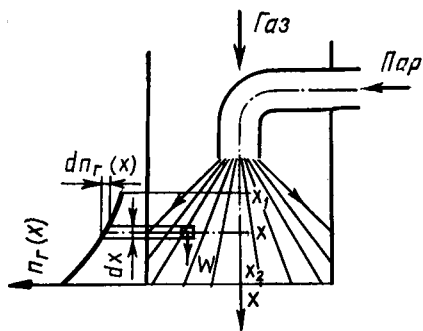


Рис. 4.32. Сопло диффузионного насоса

Теоретическая быстрота действия диффузионного насоса в связи с малым количеством откачиваемого газа определяется не изменением термодинамических характеристик паровой струи, как в эжекторном насосе, а геометрическими размерами сопла и парциальным давлением откачиваемого газа в паровой струе:

$$S_T = \frac{A}{n} (N_{q1} - N_{q2}), \quad (4.37)$$

где A — проекция поверхности паровой струи, доступной для молекул откачиваемого газа, на плоскость, перпендикулярную оси x ; N_{q1} и N_{q2} — количество молекул откачиваемого газа, ударяющихся и вылетающих в единицу времени с единицы площади A ; n — концентрация газа у входа в насос.

В соответствии с выражениями для N_q из (1.13) и $v_{ар}$ из (1.18) формулу для быстроты действия насоса (4.37) можно переписать:

$$S_T = A \frac{\sqrt{8k/(\pi m)}}{4n} (n \sqrt{T} - n_r \sqrt{T_r}); \quad (4.38)$$

здесь T и T_r — температура газа в паровой струе и у входа в насос; n_r — концентрация газа в паровой струе.

Так как $n_r/n = p_{пр}/p$, то

$$S_T = \left(\frac{R}{2\pi}\right)^{1/2} \sqrt{\frac{T}{M}} A \left(1 - \frac{p_{пр}}{p} \sqrt{\frac{T_r}{T}}\right). \quad (4.39)$$

Таким образом, быстрота действия диффузионного насоса зависит от температуры и рода газа, при этом тяжелые молекулы откачиваются с меньшей быстротой действия. Реальная быстрота действия оказывается меньше теоретического значения, рассчитанного из (4.39), из-за неполного захвата молекул откачиваемого газа паровой струей. Это связано с наличием у струи «паровой опушки», появляющейся в результате потока молекул пара, имеющих тепловые скорости больше, чем скорость паровой струи.

Если ввести коэффициент захвата струи H_0 , то выражение для расчета быстроты действия может быть записано в следующем виде:

$$S_n = H_0 S_T = H_0 \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} A \left(1 - \frac{p_{np}}{p} \sqrt{\frac{T_r}{T}} \right). \quad (4.40)$$

Среднее значение коэффициента захвата $H_0 \approx 0,3$.

Для определения коэффициента компрессии и предельного давления рассмотрим более подробно процессы, происходящие в паровой струе диффузионного насоса. Концентрацию газа в точке x паровой струи обозначим $n_r(x)$ (рис. 4.32), а составляющую скорости паровой струи по направлению оси x — через W .

Производительность откачки равна разности прямого и обратного потоков:

$$Q = Q_n - Q_{об},$$

где $Q_n = n_r(x)W$; $Q_{об} = D \frac{dn_r(x)}{dx}$; D — коэффициент диффузии

газа в струе пара. Прямой поток молекул откачиваемого газа в диффузионном насосе движется за счет соударений молекул газа и пара совместно с паровой струей, а обратный возникает за счет теплового движения молекул, диффундирующих в противоположном направлении. Если достигнуто предельное давление, то $Q = 0$, откуда

$$n_r(x)W - D \frac{dn_r(x)}{dx} = 0. \quad (4.41)$$

Считая, что газ в струе пара подчиняется уравнению газового состояния, получим

$$\frac{dn_r(x)}{n_r(x)} = \frac{dp_r(x)}{p_r(x)}. \quad (4.42)$$

Проинтегрировав выражение (4.41) с учетом (4.42) в пределах от x_1 до x_2 и от p_1 до p_2 , имеем

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{W}{D} (x_2 - x_1).$$

Обозначая длину паровой струи $b = (x_2 - x_1)$, перепишем полученное выражение в виде

$$p_2/p_1 = \exp(Wb/D).$$

Таким образом, коэффициент компрессии для заданной геометрии струи определяется отношением проекции скорости паровой струи на ось x к коэффициенту диффузии откачиваемого газа в паровой струе. Для увеличения коэффициента компрессии необходимо повышать скорость паровой струи и увеличивать ее плотность, так как коэффициент диффузии D обратно пропорционален плотности паровой струи.

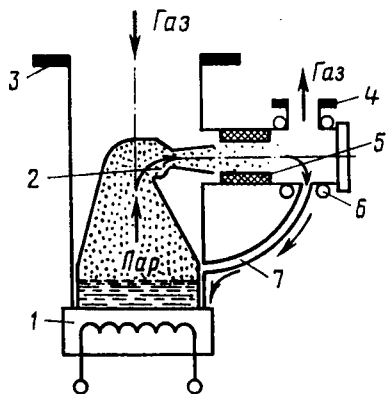


Рис. 4.33. Принципиальная схема эжекторного насоса

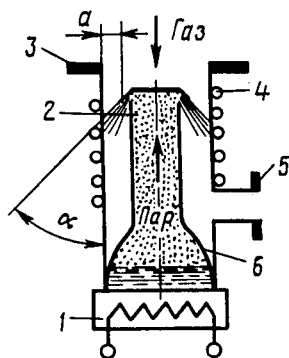


Рис. 4.34. Принципиальная схема диффузионного насоса

Рассмотрим конструкции пароструйных насосов. Схема эжекторного насоса показана на рис. 4.33. Насос состоит из кипятыльника 1, сверхзвукового эжекторного сопла Лавалья 2, камеры смешения 5, впускного и выпускного фланцев 3 и 4. Камера смешения теплоизолирована от корпуса насоса. На выпускном патрубке имеется холодильник 6, охлаждаемый проточной водой. Сконденсировавшийся на стенках холодильника пар стекает в кипятыльник по трубке 7, обеспечивающей непрерывную циркуляцию рабочей жидкости в насосе.

Простейший диффузионный насос (рис. 4.34) состоит из кипятыльника 1, диффузионного сопла 2, закрепленного на паропроводе 6, холодильника 4, впускного и выпускного патрубков 3 и 5. Пары рабочей жидкости из кипятыльника проходят по паропроводу через зонтичное сопло и конденсируются на стенках насоса, охлаждаемых холодильником. За время движения пара от конца сопла до стенок насоса в струю пара диффундирует откачиваемый газ. После конденсации образовавшейся парогазовой смеси выделившийся газ откачивается через выпускной патрубок насосом предварительного разрежения, а сконденсированный пар стекает по стенкам насоса в кипятыльник через зазор между паропроводом и корпусом насоса.

Влияние зазора a и угла наклона сопла α на предельное давление и быстроту действия диффузионных насосов показано на рис. 4.35, $a, б$.

При превышении зазором a своего оптимального значения a_0 уменьшается скорость струи у стенок насоса, что приводит к увеличению обратного потока. Аналогичная зависимость существует и от угла α , который сильно влияет на осевую составляющую скорости струи.

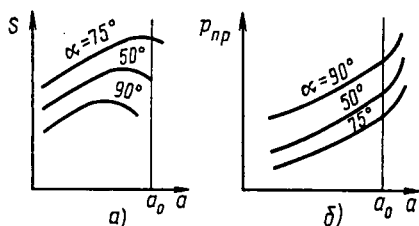


Рис. 4.35. Зависимости $S(a)$ и $p_{пр}$ (б) при различных углах наклона сопла α от величины кольцевого зазора a

Диффузионные насосы, предназначенные для работы в диапазоне давлений $10^{-1} \dots 10$ Па, называются бустерными. В этих насосах увеличена мощность подогревателя, применены термостойкие рабочие жидкости, что позволяет увеличить выпускное давление и сдвинуть характеристику насоса $S_n = f(p)$ в сторону более высоких давлений.

Основной характеристикой пароструйных насосов является зависимость быстроты действия от давления на входе в насос (рис. 4.36, а). В средней области рабочих давлений быстрота действия постоянна и равна S_{max} . При приближении рабочего давления к предельному $p_{пр}$ она стремится к нулю из-за наличия обратного потока газов и паров из насоса в откачиваемый объект. При увеличении рабочего давления за верхнюю границу молекулярного режима течения быстрота действия уменьшается в связи со снижением скорости диффузии молекул газа в струю пара и при максимальном входном давлении p_3 стремится к нулю.

Предельное давление насоса $p_{пр}$ при низких давлениях на выходном патрубке $p_{вых}$ (рис. 4.36, б) слабо зависит от изменения последнего. Срыв характеристики насоса наступает при равенстве выпускного давления и давления паровой струи, соответствующего давлению $p_{кр}$.

При увеличении мощности N подогрева насоса за счет увеличения скорости паровой струи быстрота действия вначале возрастает (рис. 4.36, в), достигает максимального значения при $N_{опт}$, а затем

уменьшается из-за увеличения плотности паровой струи. Максимальное выпускное давление насоса $p_{кр}$ при увеличении мощности подогревателя непрерывно возрастает (рис. 4.36, г).

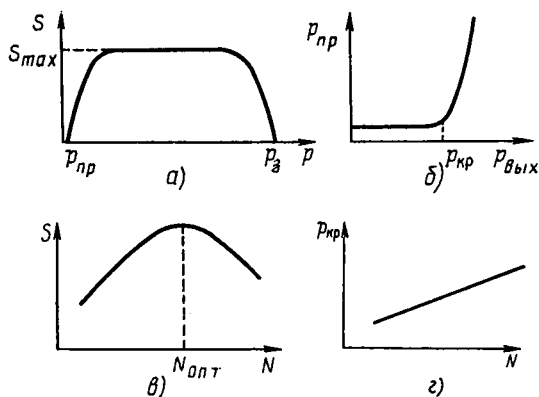


Рис. 4.36. Характеристики пароструйных насосов

§ 4.8. Конструкции пароструйных насосов

На рис. 4.37 показана конструкция многоступенчатого пароструйного насоса, в ко-

тором использованы две диффузионные 1 и 2 и эжекторная 4 ступени откачки, питающиеся от одного кипятильника 5. Корпус насоса 3 охлаждается водой.

К рабочим жидкостям пароструйных насосов предъявляются следующие требования: 1) минимальная упругость паров при комнатной температуре и максимальная при рабочей температуре в кипятильнике; 2) стойкость к разложению при нагревании; 3) минимальная способность растворять газы; 4) химическая стойкость по отношению к откачиваемым газам и по отношению к материалам насоса; 5) малая теплота парообразования.

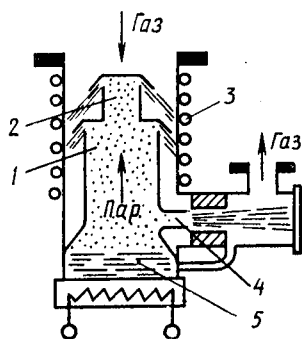


Рис. 4.37. Схема многоступенчатого пароструйного насоса

Минимальная упругость паров при комнатной температуре требуется для получения наименьшего предельного давления насоса. *Максимальное давление паров* при рабочей температуре кипятильника увеличивает выпускное давление насоса и уменьшает требуемую мощность подогревателя. *Стойкость к разложению* рабочей жидкости при нагревании влияет на срок службы рабочей жидкости и максимальное выпускное давление. *Растворимость газов* в рабочей жидкости приводит к увеличению обратного потока газов через сопло вместе с паровой струей. *Химическая стойкость* определяет срок службы рабочей жидкости и ограничивает выбор конструкционных материалов насосов. При *малой теплоте парообразования* требуется меньшая мощность подогревателя насоса.

В качестве рабочей жидкости пароструйных насосов применяется ртуть, минеральные масла, сложные эфиры органических спиртов и кислот, кремнийорганические соединения.

Ртуть (P-1, P-2), как рабочая жидкость пароструйных насосов, имеет следующие достоинства: не окисляется воздухом, однородна по составу и не разлагается при рабочих температурах насоса, растворяет малое количество газов и имеет высокую упругость пара при рабочей температуре в кипятильнике. Недостатки ртути: токсичность, химическая активность по отношению к цветным металлам, высокая упругость паров при комнатной температуре (10^{-1} Па).

Минеральные масла для пароструйных насосов (BM-1, BM-5) получают вакуумной дистилляцией продуктов переработки нефти. Они характеризуются низкой упругостью пара при комнатной температуре (10^{-6} Па), удовлетворительной термостойкостью, но имеют невысокую термоокислительную стойкость и образуют смолистые налеты на внутренних деталях насоса.

Эфиры, применяемые в качестве рабочей жидкости пароструйных насосов, представляют собой продукты синтеза фталевой и се-

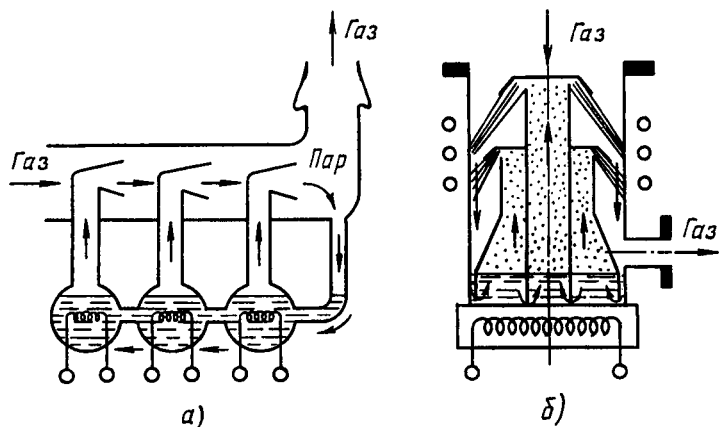


Рис. 4.38. Фракционирующие пароструйные насосы:
а — стеклянный; б — металлический

бациновой кислот с высшими спиртами, а также полифениловые соединения, состоящие из бензольных радикалов, соединенных в цепи через атомы кислорода. Полифениловые эфиры (ПФЭ) имеют очень низкое давление паров при комнатной температуре (10^{-9} Па) и высокую термоокислительную стойкость.

Кремнийорганические жидкости для пароструйных насосов (ВКЖ-94, ПФМС-2) — это полисилоксановые полимерные соединения, состоящие из функциональных групп $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$. Они обладают высокой термоокислительной стойкостью и достаточно низкой упругостью пара при комнатных температурах (10^{-5} Па).

В насосах чаще всего используют дешевые минеральные масла, кремнийорганические жидкости используются в системах с частым напуском атмосферного воздуха. Эфиры, стоимость которых еще высока, применяются для систем, где требуется получение сверхвысокого вакуума. Ртуть из-за токсичности используют в пароструйных насосах только для откачки ртутных систем, например ртутных выпрямителей. Основные типы рабочих жидкостей приведены в табл. П.1.

В насосах, работающих на неоднородных по составу или термически нестабильных жидкостях, часто применяют *фракционирующие устройства*, выделяющие более тяжелые фракции с низкой упругостью пара для работы в первой ступени откачки пароструйного насоса.

На рис. 4.38, а, б показаны конструкции стеклянного и металлического фракционирующих насосов. Сконденсировавшаяся на стенках корпуса насоса рабочая жидкость из-за большого гидравлического сопротивления достигает кипятильника первой ступени насоса за достаточно длительное время, необходимое для испарения

легких фракций. Гидравлическое сопротивление, препятствующее перемешиванию рабочей жидкости, в стеклянной конструкции создается тонкими трубками, последовательно соединяющими кипятильники различных ступеней откачки начиная со ступени, работающей при максимальном давлении откачиваемого газа. В металлической конструкции ту же роль выполняет зазор между цилиндром паропровода и основанием насоса.

Основные технические характеристики пароструйных насосов, выпускаемых промышленностью, приведены на рис. П.3 и в табл. П.5, П.6.

Так как предельное давление пароструйных насосов обусловлено обратным потоком паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объект, его можно значительно уменьшить, если на пути обратного потока установить ловушки.

По принципу действия ловушки можно разделить на *конденсирующие, диссоциирующие и сорбирующие*.

Одним из видов *конденсирующих ловушек* для пароструйных насосов является механический отражательный колпачок 1 (рис. 4.39, а). Например, обратный поток паров масла для пароструйного насоса составляет $1 \cdot 10^{-3}$ мг/(с·см²) относительно поверхности зазора между первым соплом и корпусом насоса. Если на пути обратного потока установить такую ловушку, то он за счет конденсации паров уменьшается до $1 \cdot 10^{-5}$ мг/(с·см²). Жалюзийные и конические дисковые ловушки (рис. 4.39, б) понижают обратный поток до $1 \cdot 10^{-6}$ мг/(с·см²). Конденсирующие ловушки часто охлаждаются водой. Скорость испарения паров масла с поверхностей таких ловушек значительно меньше, чем с разогретого до температуры 200°C верхнего сопла пароструйного насоса.

Охлаждаемые ловушки имеют рабочие температуры ниже комнатной. В качестве хладагента часто используются лед и NaCl (-18°C), лед и CaCl₂ (-48°C), твердая углекислота со спиртом (-78°C), фреон (-120°C), жидкий воздух (-183°C), жидкий азот (-196°C). Для получения низких температур (до -70°C) можно применять полупроводниковые элементы, работающие на эффекте Пельтье.

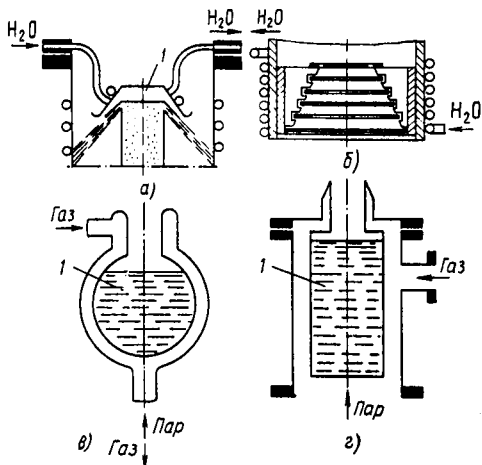


Рис. 4.39. Схема конденсирующих ловушек:

а — отражательный колпачок; б — коническая дисковая; в — охлаждаемая стеклянная; г — охлаждаемая металлическая

Понижение температуры конденсирующей поверхности уменьшает упругость паров рабочей жидкости. Например, для воды при температурах $+15$; -78 ; -196°C упругость паров соответственно $2 \cdot 10^3$; $7 \cdot 10^{-2}$; 10^{-19} Па; для ртути при $+18$ и -196°C упругость 10^{-1} и 10^{-30} Па.

Быстрота откачки единицы поверхности конденсирующих ловушек определяется разностью молекулярных потоков, ударяющихся N_1 и вылетающих N_2 с конденсирующей поверхности:

$$S = \frac{N_1 - N_2}{n_1} = \sqrt{\frac{kT_1}{2\pi m}} \left(1 - \frac{n_2}{n_1} \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \right), \quad (4.43)$$

что для $T_1 = 298$ К будет иметь вид

$$S = 116 \sqrt{\frac{29}{M}} \left(1 - \frac{p_2}{p_1} \sqrt{\frac{298}{T_2}} \right),$$

где n_1 и n_2 — молекулярные концентрации паров рабочей жидкости в газовой фазе и на конденсирующей поверхности; T_1 и T_2 ; p_1 и p_2 — температуры и давления паров рабочей жидкости в газовой фазе и на конденсирующей поверхности; M — молекулярная масса рабочей жидкости, кг/кмоль.

Конструкции конденсирующих металлических и стеклянных азотных ловушек показаны на рис. 4.39, *в, г*. Жидкий азот, охлаждающий конденсирующую поверхность, заливается в полость *1*.

На нагретых поверхностях *диссоциирующих ловушек* углеводороды разлагаются на легкооткачиваемые газы: водород, оксид углерода, диоксид углерода и твердый углерод, который осаждается на стенках ловушки, а легкие газы откачиваются пароструйными насосами. Диссоциирующие поверхности разогреваются прямым пропусканием электрического тока.

Работа электронных диссоциирующих ловушек основана на возбуждении или ионизации молекул рабочей жидкости в разряде с холодным или горячим катодом. Возбуждение увеличивает склонность молекул к диссоциации и последующей полимеризации на стенках ловушки. При достаточной энергии электронов сложные молекулы масла после взаимодействия могут распадаться на более легкие составляющие и углерод. Легкие составляющие откачиваются насосом, а углерод осаждается на стенках ловушки. Эффективность ловушек зависит от плотности электронного тока. Диссоциирующие ловушки могут использовать каталитическое разложение паров масла на окисленных металлических поверхностях.

Сорбционные ловушки поглощают пары масел поверхностями пористых адсорбентов: активных углей, цеолитов, силикагелей и т. д. Адсорбенты должны быть очищены от посторонних веществ, адсорбированных в порах молекулярных размеров при обычных атмосферных условиях прогревом в вакууме при температуре около 300°C . Адсорбция паров масел на очищенных поверхностях осуще-

ствляется обычно при комнатной температуре до тех пор, пока равновесное давление паров масла меньше допустимого. После этого ловушку необходимо регенерировать прогревом. Основные составляющие воздуха — азот и кислород — при комнатной температуре адсорбируются в очень малых количествах.

Можно ориентировочно рассчитать срок службы сорбционной ловушки, принимая с запасом, что в ней поглощается весь обратный поток паров масла.

Воспользовавшись уравнением изотермы полимолекулярной адсорбции (2.17), равновесное давление паров масла в ловушке запишем в следующем виде:

$$p = p_T \frac{C(\theta - 1) + \sqrt{C^2(\theta - 1)^2 + 4\theta^2(C - 1)}}{2\theta(C - 1)}, \quad (4.44)$$

где p_T — давление насыщенных паров масла при рабочей температуре ловушки; $C = \exp\left(\frac{Q_a - E}{RT}\right)$; θ — степень покрытия поверхности адсорбента мономолекулярным слоем.

Так как $\theta = \frac{1}{a_m A} \int_0^t q dt$, где q — обратный поток паров масла;

A — активная поверхность адсорбента, то при постоянном обратном потоке паров масла ($q = \text{const}$) легко определить срок службы ловушки:

$$t_c = a_m A \theta_{\max} / q.$$

Здесь θ_{\max} определяется из (4.44) при $p = p_{\max}$ (p_{\max} — максимально допустимое давление паров масла в откачиваемом объекте).

Конструктивная схема адсорбционной ловушки, показанная на рис. 4.40, состоит из корпуса 4, нагревателя 3, адсорбента 2, отражателей 1, которые обеспечивают оптическую плотность ловушки. Материалы, из которых изготовлена ловушка, должны допускать прогрев до 300...400°C. Адсорбент необходимо располагать так, чтобы предотвратить миграцию паров масла в откачиваемый объект по стенкам ловушки. При проектировании ловушек следует конструктивными методами снижать ее тепловую инерцию, ухудшающую условия эксплуатации.

Общей проблемой проектирования ловушек любого типа является выполнение двух противоречивых требований: максимального защитного действия и наибольшей удельной проводимости. Защитное действие ловушек можно оценивать средним числом соударений

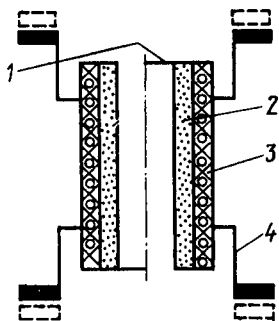


Рис. 4.40. Схема адсорбционной высоковакуумной ловушки

молекулы, прошедшей через ловушку, с ее защитными элементами. Повышение защитного действия обычно сопровождается снижением удельной проводимости ловушки. Задаваясь весовыми коэффициентами значимости этих параметров для соответствующего технологического процесса, можно выбрать оптимальные размеры защитных элементов ловушки (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Защитные элементы ловушек

Наименование ловушки	Схемы	Соотношение оптимальных размеров	Удельная проводимость, $\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$
Жалюзийная		$D/B > 5;$ $\theta = 60^\circ$	$4,8 \cdot 10^{-3}$
Шевронная		$D/B > 5;$ $\theta = 60^\circ$	$3,16 \cdot 10^{-3}$
Коническая кольцевая		$\theta = 60^\circ$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Угловая		$A = B = 3R$	$3,27 \cdot 10^{-3}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что дает перепуск газа в объемных насосах?
2. Зачем напускается балластный газ в объемные насосы?
3. В чем заключается принцип действия молекулярных насосов?
4. Как влияет род откачиваемого газа на быстроту действия турбомолекулярного насоса?

5. В чем состоит различие между эжекторными и диффузионными пароструйными насосами?
6. Для чего применяются фракционирующие устройства в пароструйных насосах?
7. Что такое коэффициент использования вакуумного насоса?
8. Какие основные параметры любого вакуумного насоса?
9. Какие рабочие жидкости используются в пароструйных насосах?
10. Каково назначение вакуумных ловушек?

ГЛАВА 5

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА

§ 5.1. Общая характеристика

Физико-химические методы получения вакуума позволяют для работы в определенном диапазоне давлений создавать насосы с лучшими, чем у механических, технико-экономическими показателями. Существенное преимущество физико-химических насосов перед механическими заключается в возможности устранения загрязнения откачиваемой камеры парами рабочих жидкостей, которые присутствуют во многих механических насосах для смазки и герметизации.

Направленное движение предварительно заряженных молекул газа под действием электрического поля является основой работы ионных насосов.

Испарительные насосы работают на принципе хемосорбции. Физическая адсорбция и конденсация используются для откачки газов криосорбционными насосами: криоадсорбционными и криоконденсационными.

В связи с тем, что теплота конденсации обычно меньше теплоты адсорбции, криоконденсация одного и того же количества газа наблюдается при более низких температурах, чем криоадсорбция, что делает техническую реализацию криогенной системы криоконденсационного насоса более сложной, чем криоадсорбционного. Преимуществом криоконденсационной откачки является большая быстрота откачки на единицу площади охлаждаемой поверхности.

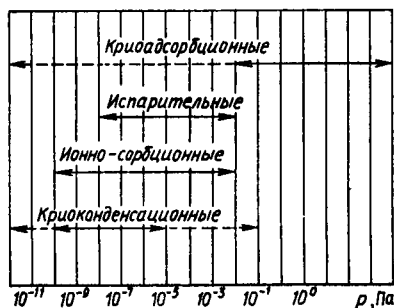


Рис. 5.1. Диапазоны рабочих давлений вакуумных насосов, работающих на физико-химических методах откачки:

— промышленные образцы, - - - лабораторные образцы

Принцип ионной откачки совместно с сорбционным используется в конструкциях ионно-сорбционных насосов. Диапазоны рабочих давлений промышленных и лабораторных образцов насосов, работающих на принципах физико-химической откачки, показаны на рис. 5.1.

§ 5.2. Ионная откачка

Для передачи молекулам импульса скорости в направлении насоса предварительного разрежения можно использовать силу воздействия постоянного электрического поля, если нейтральные молекулы газа предварительно превратить в заряженные частицы. Для ионизации газа можно использовать α -, β - и γ -излучение.

Наиболее эффективным является β -излучение, осуществляемое за счет электронной бомбардировки. Эффективность ионизации электронами средних энергий (см. рис. 3.4), прошедшими разность потенциалов 100 В, в зависимости от рода газа составляет от 3 до 25 пар ионов на пути 1 м при давлении 1 Па. С понижением давления наблюдается пропорциональное уменьшение количества образовавшихся ионов.

На рис. 5.2. показана схема работы ионного насоса. Газ, поступающий в насос, ионизируется в пространстве ионизации 1, а затем с помощью ускоряющих электродов 2, к которым приложена разность потенциалов U (В), направляется к выходному патрубку насоса. Здесь ионы нейтрализуются и откачиваются насосом предварительного разрежения.

В таком насосе существует прямой поток откачиваемого газа Q_1 , определяемый ионным током I_+ в цепи ускоряющих электродов 2:

$$Q_1 = k T I_+ / q, \quad (5.1)$$

где q — электрический заряд иона.

Обратный поток нейтральных молекул зависит от проводимости насоса U и разности давлений на входе $p_{вх}$ и выходе $p_{вых}$ насоса:

$$Q_{обр} = U (p_{вых} - p_{вх}). \quad (5.2)$$

Эффективная производительность насоса определяется разностью прямого и обратного потоков:

$$Q_n = Q_{пр} - Q_{обр} = k T I_+ / q - U (p_{вых} - p_{вх}),$$

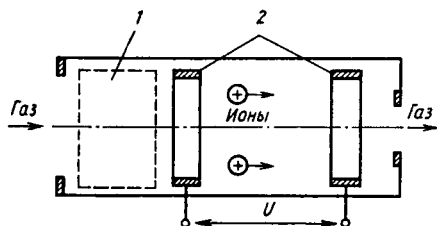


Рис. 5.2. Схема ионной откачки

а быстрота откачки насоса

$$S_n = \frac{Q_n}{P_{вх}} = \frac{kT I_+}{q P_{вх}} - U \left(\frac{P_{вых}}{P_{вх}} - 1 \right). \quad (5.3)$$

При $K = p_{вых}/p_{вх} = 1$ быстрота действия насоса максимальна:

$$S_{max} = \frac{kT I_+}{q P_{вх}}. \text{ При } S_n = 0 \text{ максимальный коэффициент компрессии:}$$

$$K_{max} = 1 + \frac{S_{max}}{U}. \text{ Таким образом, уравнение (5.3) можно записать}$$

еще в таком виде:

$$S_n = S_{max} - U(K - 1). \quad (5.4)$$

Откачная характеристика (5.4) аналогична откачной характеристике молекулярного насоса (см. рис. 4.22). Однако из-за трудности обеспечения эффективной ионизации газа при низких давлениях и малой проводимости насоса для обратного потока газа удельные энергетические затраты на единицу быстроты откачки ионных насосов пока еще слишком велики, что препятствует их промышленному применению.

§ 5.3. Хемосорбционная откачка

Хемосорбционная откачка осуществляется путем поглощения активных газов на поверхности металлов. Показателем активности газа является его теплота адсорбции на данном металле. Наибольшее распространение для хемосорбционной откачки получили следующие металлы: Ti, Zr, Ta, Ba, Mo, W, Hf, Er.

Теплота адсорбции Q_a при малых степенях заполнения поверхности сильно зависит от рода газа; например, для Ti поглощающего все газы, кроме инертных, имеем:

Газ	H ₂	CO	N ₂	O ₂	CO ₂	Ar	Kr	Xe
Q_a , кДж/моль	19,3	419	356	813	461	8,38	16,8	33,5

Для увеличения поверхности металла при его взаимодействии с откачиваемыми газами используется распыление металла, сопровождающееся нанесением тонких пленок на электроды или корпус насоса. Возможность непрерывного обновления напыленной пленки увеличивает срок службы насоса.

Напыление происходит при давлениях паров вещества, больших давления насыщенного пара над поверхностью напыления, когда на единице поверхности в единицу времени конденсируется большее число молекул, чем испаряется. Скорость конденсации из газовой фазы можно рассчитать по уравнениям (2.9) и (2.11).

Рассмотрим особенности процесса конденсации молекул, испаряемых из бесконечно малых источников на плоскую подложку в высоком вакууме. Скорость конденсации при этом $dG_k = G_k dP$.

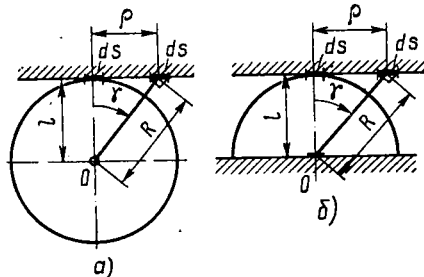


Рис. 5.3. Схема процесса напыления на плоскую поверхность из различных источников:

а — точечного, б — плоского

Если молекула испаряется из точечного источника, то dP определяется согласно (2.13), а $d\omega = dS \cos^2 \gamma / R^2$, где R — расстояние от источника до площадки dS на подложке (рис. 5.3, а). При этом выражение для скорости конденсации $dG_{KR} = G_n \cos \gamma dS / (4\pi R^2)$.

Поток молекул, попадающих на площадку dS , расположенную на кратчайшем расстоянии l от источника,

$$dG_{Kl} = G_n dS / (4\pi l^2). \quad (5.5)$$

Тогда отношение толщин пленок конденсата, нанесенных за одинаковый промежуток времени на участки поверхности, отстоящие от источника на l и R ,

$$\frac{h_l}{h_r} = \frac{dG_{Kl}}{dG_{KR}} = \frac{R^2}{l^2 \cos \gamma} = \frac{R^3}{l^3} = \left[1 + \left(\frac{\rho}{l} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (5.6)$$

Из (5.6) следует, что при $\rho = l$ толщины слоев конденсата в центре и на краю подложки будут отличаться в 2,8 раза. Для допускаемой неравномерности толщины покрытия, равной 5%, минимальное расстояние между источником и подложкой должно быть 3,6р.

При конденсации молекул, вылетающих из бесконечно малого плоского источника O (рис. 5.3, б), вероятность вылета определяется из (2.14). Тогда, аналогично (5.5) и (5.6), получим $dG_{Kl} = G_n dS / (\pi l^2)$; $dG_{Kl} = G_n \cos^2 \gamma dS / (\pi R^2)$.

Отношение толщин конденсата при нанесении из плоского источника

$$h_l/h_r = R^4/l^4 = [1 + (\rho/l)^2]^2. \quad (5.7)$$

При $\rho = l$ толщины пленки в центре и на краю подложки будут отличаться в четыре раза. При получении пленки с неравномерностью толщины 5% необходимо располагать подложку на расстоянии 6,3р от источника. Плоский источник дает большую, чем точечный, скорость нанесения покрытия (в четыре раза при $\gamma = 0$), но неравномерность покрытия при этом возрастает.

Неравномерные покрытия, равнодоступные молекулам откачиваемого газа, хуже используют запас активного вещества в насосе.

Быстрота поглощения газа пленкой S_0 зависит от ее материала, рода газа и температуры пленки. Для 1 см^2 титановой периодически напыляемой пленки S_0 для H_2 и N_2 при 77 К соответственно равны $26 \cdot 10^{-3}$ и $7 \cdot 10^3$, а при 293 К — $15 \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$.

Поглощение газов пленками может носить поверхностный или объемный характер. При *поверхностном* поглощении для небольших степеней покрытия количество сорбированного газа прямо пропорционально времени сорбции. *Объемное* поглощение происходит за счет диффузии газов в пленку, и количество поглощенного газа на начальном участке сорбционной кривой пропорционально корню квадратному из времени сорбции.

Поверхностный характер сорбции наблюдается обычно при низких температурах, объемный — при высоких. Титановая пленка при температурах выше 150 К водород поглощает объемно. Коэффициент диффузии водорода при температуре 220 К составляет 10^{-15} см²/с, а при 300 К — $2 \cdot 10^{-11}$ см²/с.

При поверхностном поглощении водорода на титановых пленках при $T > 77$ К за счет каталитических реакций со свободным углеродом, растворенным в пленке, происходит образование и выделение метана CH₄.

Такие газы, как N₂, O₂, CO и CO₂, начинают поглощаться объемно титаном только при температурах более 1000 К. Поглощение воды сопровождается выделением водорода.

Сорбционные характеристики пленок сильно зависят от условий их образования. Пленка, осажденная при низкой температуре, имеет пористую структуру, что приводит к значительному повышению скоростей поглощения газов.

§ 5.4. Конструкции испарительных насосов

Конструкция испарительного насоса в основном определяется типом испарителя. Испарители бывают прямонакальные, подогревные, электронно-лучевые и дуговые.

В качестве *прямонакального* испарителя (рис. 5.4, а) используется биметаллическая проволока с молибденовым керном, на который иодидным способом осажден слой титана.

Подогревный испаритель (рис. 5.4, б) представляет собой сферическую оболочку из активного материала, внутри которой вставлен проволочный нагреватель. Для титана максимальная рабочая температура таких испарителей составляет 1150°C, что обеспечивает максимальную скорость испарения 1 мг/с.

Электронно-лучевой испаритель (рис. 5.5, а) представляет собой электронную пушку с вольфрамовым катодом *I*, помещенную в поперечное магнитное поле. Магнитное поле позволяет разместить пушку вне зоны нанесения активного материала. Между пушкой и мишенью прикладывается ускоряющее напряжение в несколько тысяч вольт. Максимальная скорость испарения из жидкой фазы может достигать 30 мг/с.

В *дуговых* испарителях (рис. 5.5, б) активный материал распляется в катодном пятне дуги постоянного тока. Катодное пятно хаотически перемещается по поверхности охлаждаемого водой ка-

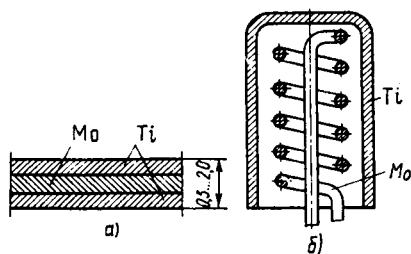


Рис. 5.4. Конструкции электро-термических испарителей:
а — прямоугольный; б — подогреваемый

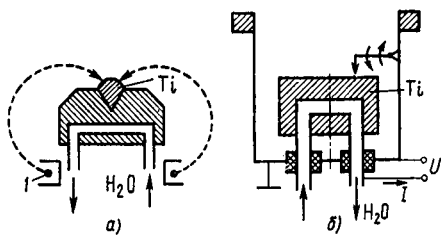


Рис. 5.5. Конструкции электронно-ионных испарителей:
а — электронно-лучевой, б — дуговой

тода из титана. Плотность тока в пятне достигает 10^6 А/см². Дуга горит в парах испаряемого материала, что позволяет поддерживать разряд даже в условиях сверхвысокого вакуума. Возбуждение дуги происходит, например, при коротком замыкании постоянного электрода. Питание дуги осуществляется от источника постоянного тока с $U=30 \dots 50$ В и $I=100 \dots 180$ А. Максимальное давление запуска не превышает 10 Па. При больших давлениях анодное пятно становится неподвижным и может расплавить стенку насоса. Скорость испарения в дуговых испарителях может достигать 20 мг/с.

В насосах испарительного типа, не имеющих устройств для ионной откачки, предельное давление составляет обычно 10^{-7} Па. Охлаждение активной пленки до температуры жидкого азота снижает предельное давление до 10^{-11} Па.

Верхний предел рабочих давлений, равный 10^{-2} Па, лимитируется образованием во время работы испарителя оксидов, нитридов и карбидов на поверхности активного материала, что приводит к уменьшению скорости испарения. Максимальная быстрота действия насосов такого типа при откачке водорода достигает $2 \cdot 10^5$ л/с. Применение испарительных насосов неэффективно при откачке продуктов органического происхождения и инертных газов.

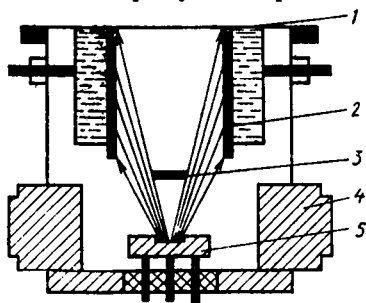


Рис. 5.6. Испарительный насос

Испарительный насос (рис. 5.6) состоит из корпуса 4, в котором размещается испаритель 5. Атомы активного металла, вылетающие из испарителя, конденсируются на экранах 2 и обеспечивают откачку химически активных газов. Экран 3 защищает откачиваемый объект, присоединяемый к насосу через фланец 1, от проникновения паров испаряемого материала. Экраны 2 для повышения быстроты откачки могут охлаждаться жидким азотом.

§ 5.5. Кривоконденсационная откачка

Кривоконденсационная откачка возможна при условии, что давление откачиваемого газа в вакуумной системе выше давления его насыщенных паров в насосе (см. рис. 2.5).

Скорость конденсации, согласно (2.9),

$$G_k = \gamma p_r \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_r}},$$

где p_r — давление газа.

Воспользуемся выражением для скорости испарения (2.11)

$$G_u = \gamma p_T \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_T}},$$

где p_T — давление насыщенных паров адсорбата при температуре T .

Принимая во внимание, что плотность газа $\rho = p_r M / (RT_r)$, запишем выражение для быстроты конденсационной откачки:

$$S_k = \frac{\beta}{\rho} (G_k - G_u) = 36,4\beta \sqrt{\frac{T_r}{M}} \left(\gamma - \frac{p_T}{p_r} \sqrt{\frac{T_r}{T_n}} \right), \quad (5.8)$$

где β — коэффициент, учитывающий входное сопротивление.

Используя зависимость давления насыщенного пара вещества от температуры (2.6) в виде $\ln p = M - N/T_n$, где M и N — постоянные коэффициенты (см. табл. 2.5), после преобразований получим

$$S_k = 36,4\beta \sqrt{\frac{T_r}{M}} \left(\gamma - \frac{\exp(M - N/T_n)}{p_r} \sqrt{\frac{T_r}{T_n}} \right). \quad (5.9)$$

При $p_r \gg p_T$ наблюдается максимальная быстрота действия кривоконденсационного насоса, равная скорости конденсации. При $\beta = \gamma = 1$

$$S_{\max} = 36,4 \sqrt{T_r/M}, \quad (5.10)$$

где величина S_{\max} [$\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$] (в зависимости от температуры и рода газа имеет следующие значения: при $T = 293$ и 78 К соответственно для N_2 — 118 и 61; Q_2 — 110 и 57; Ne — 139 и 72; H_2 — 442 и 228).

На рис. 5.7 приведена удельная быстрота откачки азота, имеющего температуру 293 К, при $\beta = \gamma = 1$ в зависимости от давления и температуры криповерхности в соответствии с (5.9).

Предельное давление кривоконденсационной откачки зависит от температуры поверхности, на которой происходит конденсация откачиваемого газа. При $S_k = 0$, $p_r = p_{np}$ воспользуемся уравнением

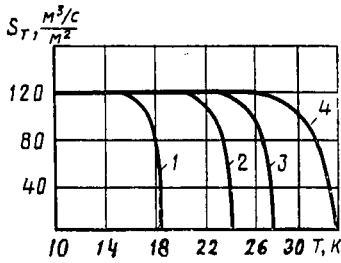


Рис. 5.7. Зависимость удельной быстроты откачки азота от температуры криоповерхности при давлении:
 1 — 10^{-10} Па; 2 — 10^{-9} Па; 3 — 10^{-8} Па; 4 — 10^{-1} Па

Газ	N ₂	H ₂	CH ₄	Ar	Kr	Ne
ρ_T , кг/м ³	950	80	520	1690	2960	1440

При откачке азота с производительностью 10^{-2} м³·Па/с на площади 0,1 м² за 10^6 с образуется слой конденсата толщиной 1,5 мм.

Уравнение теплового баланса на поверхности криоосадка можно записать в следующем виде:

$$H = \lambda \frac{T_n - T_k}{h};$$

здесь H — суммарный тепловой поток на единицу поверхности криоосадка; T_k и T_n — температуры криоагента и поверхности криоосадка; λ — коэффициент теплопроводности криоосадка:

Газ	N ₂	H ₂	CH ₄	Ar	Kr	Ne
λ , Вт/(м·К)	10^{-1}	1	$8 \cdot 10^{-2}$	2	2	1

Решая уравнение теплового баланса относительно T_n , получим $T_n = T_k + Hh/\lambda$.

Для $H = 50$ Вт/м² после образования криоосадка азота толщиной 1,5 мм превышение температуры криоповерхности над температурой криоагента составит 0,75 К.

Подставляя выражение, полученное для T_n , в (5.11), получим

$$p_{пр} = \sqrt{\frac{T_r}{T_k + Hh/\lambda}} \exp\left(M - \frac{N\lambda}{T_k\lambda + l'h}\right) / \gamma. \quad (5.12)$$

(5.9) для определения предельного давления:

$$p_{пр} = \sqrt{T_r/T_n} \exp(M - N/T_n) / \gamma. \quad (5.11)$$

При работе насоса происходит образование криоосадка на конденсирующей поверхности. Толщина криоосадка

$$h = \frac{t(G_k - G_n)}{A\rho_T},$$

где t — время работы насоса; A — площадь конденсирующей поверхности; ρ_T — плотность газов в твердом состоянии

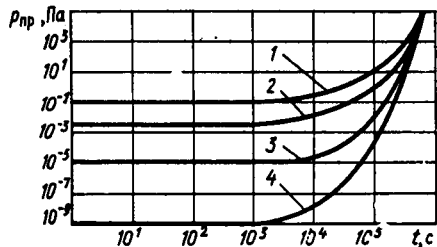


Рис. 5.8. Зависимость предельного давления криоконденсационного насоса от времени работы при:
 $T_r = T_n$, $A = 0,01$ м², $Q = 10^{-1}$ м³ Па/с; 1 — 35 К, 2 — 30 К, 3 — 25 К, 4 — 20 К

Таким образом, предельное давление насоса ухудшается с ростом толщины криоосадка. На рис. 5.8 показаны зависимости предельного давления от времени работы насоса, рассчитанные по уравнению (5.12) с учетом того, что $h = Qt/(A\rho_r)$.

§ 5.6. Криoadсорбционная откачка

Криoadсорбционная откачка осуществляется адсорбцией газов на охлаждаемых адсорбентах. Равновесное давление откачиваемых газов определяется изотермами адсорбции [см. (2.17)... (2.19)], устанавливающими связь между количеством поглощенного газа и давлением при постоянной температуре. Количество адсорбированного газа должно составлять значительную часть газа в объеме вакуумной системы, что обычно наблюдается при температурах адсорбирующих поверхностей ниже температуры кипения газа при атмосферном давлении.

Уравнение материального баланса криoadсорбционной откачки неподвижным адсорбентом можно записать в виде равенства количества газа в адсорбционной и газовой фазах до и после процесса откачки:

$$p_0 v + K_{T_1} p_0 + \int_0^t q_1 dt = p_1 v \frac{T_1}{T_2} + K_{T_2} p_1, \quad (5.13)$$

где p_0 и p_1 — начальное и конечное давления; $v = V_k/V_a$ — объемная нагрузка насоса; V_k — объем откачиваемой камеры; V_a — объем адсорбента в насосе; q_1 — суммарная производительность газовой выделенной и натекающей на единицу объема адсорбента, T_1 и T_2 — начальная и конечная температура адсорбента в насосе, $T_2 < T_1$; K_{T_1} и K_{T_2} — коэффициенты адсорбируемости газа при температурах T_1 и T_2 .

Если $q_1 = \text{const}$, тогда

$$p_1 = \frac{p_0 (v + K_{T_1}) + q_1 t}{v T_1 / T_2 + K_{T_2}}. \quad (5.14)$$

Если $\int_0^t q dt \ll p_0 v + K_{T_1} p_0$, тогда

$$p_1 = p_0 \frac{v + K_{T_1}}{v T_1 / T_2 + K_{T_2}}. \quad (5.15)$$

Для обычных вакуумных систем ($V_k = 50$ л; $V_n = 1$ л) $v \approx 50$. При откачке азота от атмосферного давления активным углем СКТ-2 при $T_1 = 293$ К, $K_{293} = 10^2$ и при $T_2 = 77$ К, $K = 10^8$ (табл. 5.1) получим, согласно (5.15), $p_1 = 1,5 \cdot 10^{-1}$ Па. Таким образом, давление снижается почти в 10^6 раз.

Характеристики адсорбентов при поглощении азота

Адсорбент	K_T		$H, \text{ м}^2/\text{с}$		$a, \text{ м}^2/\text{с}$		Примечание
	77 К	298 К	77 К	298 К	298 К	77 К	
Активный уголь							
СКТ-2	10^8	10^2	10^{-11}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-8}	
Цеолит СаА-4В	10^8	10^3	10^{-10}	10^{-8}	10^{-8}	10^{-8}	
Силикагель, КСМ-6	10^7	10^2	10^{-11}	10^{-9}	10^{-7}	10^{-7}	$p = 10^{-1} \dots$ $\dots 10^{-5} \text{ Па}$
Алюмосиликат- ный катализатор АС	10^7	10^2	10^{-11}	10^{-9}	10^{-7}	10^{-7}	

Подбирая температуру десорбции, можно обеспечить, чтобы $K_{T1} \ll v \ll K_{T2}$, тогда

$$p_1 \approx p_0 \frac{v}{K_{T2}}. \quad (5.16)$$

Если к откачиваемому объекту параллельно подключено n адсорбционных насосов, для каждого из которых и для всех вместе выполняются условия, указанные для уравнения (5.16), то многоступенчатая (n — число ступеней) откачка, при которой последовательно запускается и после достижения предельного давления перекрывается клапаном каждый из насосов, обеспечить конечное давление $p_n = p_0 (v/K_{T2})^n$.

Для $n=2$, $v=50$ и $p_0=10^5$ Па при откачке азота $K_{77}=10^8$ получим для p_n значение $2,5 \cdot 10^{-8}$ Па.

При температуре жидкого азота значительно худшие результаты можно получить при откачке гелия, неона и водорода. Коэффициенты адсорбируемости этих газов при температуре жидкого азота (77 К), представленные в табл. 5.2, значительно меньше, чем для азота. При одноступенчатой откачке не удастся достичь заметного снижения давления. При откачке атмосферного воздуха, парциальное давление гелия, неона и водорода в котором происходит обогащение остаточных газов плохо адсорбируемыми компонентами, которые ограничивают возможность сужения предельного давления насоса. Для эффективной адсорбционной откачки всех газов, входящих в состав атмосферного воздуха, требуются температуры $\sim 30 \dots 20$ К.

Быстрота адсорбционной откачки определяется процессом нестационарной диффузии газа в пористой структуре адсорбента. Диффузия идет как в газовой фазе, так и по поверхности пор. При

Коэффициенты адсорбируемости различных газов на активном угле
при температуре жидкого азота

Коэффициент	He	Ne	H ₂	N ₂	Примечание
K_{T7} , (м ³ ·Па)/м ³ ·Па	2	20	1600	10 ⁸	$p=10^{-1} \dots 10^{-5}$ Па

низких температурах в микропорах определяющей становится поверхностная диффузия. Уравнение этого процесса можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = H \left(\frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{K_1}{x} \frac{\partial a}{\partial x} \right). \quad (5.17)$$

При граничных условиях $a(x, 0) = a_0$; $a(x, \infty) = a_\infty$

$$\frac{\partial a(0, t)}{\partial x} = 0; \quad q_1(R, t) = \frac{H}{K_2 R} \frac{\partial a(R, t)}{\partial x}, \quad (5.18)$$

где a — количество адсорбированного газа в единице объема адсорбента; x — текущая координата по сечению адсорбционного слоя; R — характерный размер адсорбента; H — коэффициент диффузии; K_1 — коэффициент формы адсорбента, для неограниченной пластины $K_1=0$, для неограниченного цилиндра $K_1=1$, для шара $K_1=2$; $K_2=V/(FR)$ — коэффициент формы (F и V — поверхность и объем адсорбента); для неограниченной пластины $K_2=1$, для неограниченного цилиндра $K_2=0,64$, для шара $K_2=0,64$.

Решение уравнения (5.17) при граничных условиях (5.18) можно представить в виде

$$a(R, t) = a_0 + \frac{q_1 R^2}{H} \left(K_3 \tau + K_4 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_5}{\mu_n^2} \exp(-\mu_n^2 \tau) \right), \quad (5.19)$$

где $\tau = Ht/R^2$; K_3, K_4, K_5 — постоянные формы адсорбента для неограниченной пластины, неограниченного цилиндра и шара; соответственно равны $K_3=1$; $\frac{4}{\pi}$; $\frac{6}{\pi}$; $K_4=\frac{1}{3}, \frac{1}{2\pi}, \frac{2}{5\pi}$; $K_5=2$;

$\frac{4}{\pi}, \frac{4}{\pi}$; μ_n — корни характеристического уравнения $\operatorname{tg} \mu = 0$ (для неограниченной пластины), $J_1(\mu) = 0$ (для неограниченного цилиндра) и $\operatorname{tg} \mu = \mu$ (для шара).

Записанное решение при $a = K_T p$ можно преобразовать для малых и больших значений безразмерного времени $\tau = Ht/R^2$.

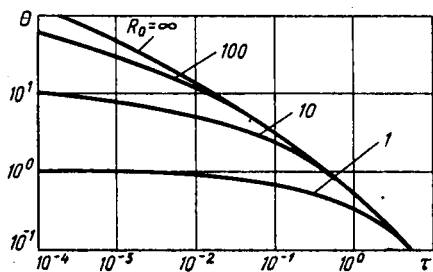


Рис. 5.9. Зависимость безразмерной удельной скорости действия θ от безразмерного времени τ для адсорбента шаровой формы

Для неограниченной пластины при $\tau \geq 0,42$, неограниченного цилиндра при $\tau \geq 0,27$ и шара при $\tau \geq 0,19$

$$\theta = \frac{Ro}{1 + Ro(K_3\tau + K_4)}$$

Для неограниченной пластины при $\tau < 0,42$, неограниченного цилиндра при $\tau < 0,27$ и шара при $\tau < 0,19$

$$\theta = \frac{Ro}{1 + 2Ro K_6 \sqrt{\tau/\pi}}; \quad (5.20)$$

здесь $\theta = \frac{S_1 R^2}{K_T H}$; $Ro = \frac{q_1 R^2}{a_0 H}$; S_1 — быстрота откачки насоса на

единицу насыпного объема адсорбента; K_6 — коэффициент формы; $K_6 = 1$ для неограниченной пластины; $K_6 \approx 0,64 (1 + 0,44 \sqrt{\tau})$ для неограниченного цилиндра, $K_6 \approx 0,64 (1 + 0,89 \sqrt{\tau})$ для шара.

Рассчитанные по уравнениям (5.20) зависимости безразмерной удельной скорости действия криоадсорбционного насоса от безразмерного времени для адсорбента в форме шара приведены на рис. 5.9.

Для насоса с 1 л насыпного объема адсорбента, выполненного в форме пластины толщиной $2R = 3$ мм, при коэффициенте нестационарной диффузии $1,4 \cdot 10^{-11}$ м³/с и коэффициенте адсорбируемости $5,3 \cdot 10^6$ при начальном равновесном давлении 10^{-4} Па удельная быстрота откачки при $q_1 = 4,23 \cdot 10^{-6}$ м³·Па/(с·м³) составит 0,01 л/(с·см²) и будет сохранять свое значение 10^4 с. Быстрота откачки зависит от величины потока газа. При увеличении потока на два порядка во столько же раз увеличится быстрота откачки и достигнет в данном примере 1 л/(с·см²). Однако она не будет постоянной и практически сразу начнется ее уменьшение.

Удельная быстрота адсорбционной откачки в 5... 10 раз меньше, чем конденсационной, и имеет более сильную зависимость от количества поглощенного газа.

Непрерывная регенерация части адсорбента во время работы насоса реализуется в адсорбционных насосах непрерывного действия, обеспечивающих постоянную быстроту действия независимо от продолжительности работы насоса.

Количество поглощаемого и десорбированного газов в неравновесном состоянии определяется решением нестационарного уравнения диффузии (5.17) при начальных и граничных условиях: $a(0, x) = a_0$; $a(t, R) = a_R$; $da(t, 0)/dx = 0$. При адсорбции $a_R = a_m$, при десорбции $a_R = a_0$

Решение уравнения (5.17) при указанных граничных условиях можно представить в следующем виде:

$$a = (a_R - a_0) \left(1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp(-k^2 \pi^2 \tau) \right) = (a_R - a_0) v.$$

При малых $\tau = Dt/R^2 < 2 \cdot 10^{-2}$ степень заполнения адсорбента

$$v = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp(-k^2 \pi^2 \tau) = 6 \sqrt{\tau/\pi}.$$

Быстрота непрерывной адсорбционной откачки

$$S_H = S_{\max} \left(1 - \frac{K_{T1} p_2}{K_{T2} p_1} \right) v, \quad (5.21)$$

где $S_{\max} = v_L F K_{T2}$ — максимальная быстрота откачки; v_L — скорость транспортирования адсорбента; F — площадь поперечного сечения адсорбционного слоя. Для $v_L = 0,1$ см/с, $F = 1$ см², $K_{T2} = 10^7$ получим $S_{\max} = 10^3$ л/с.

Так как предельное давление $p_{\text{пр}} = p_1$ при $S_H = 0$, из уравнения (5.21) запишем

$$p_{\text{пр}} = p_2 \frac{K_{T1}}{K_{T2}},$$

что для угля СКТ-2Б при $K_{T1} = 10^2$, $K_{T2} = 10^7$ дает величину $p_{\text{пр}} = 10^{-5} p_2$.

Характерная зависимость $S_H = f(v_L)$ для насосов непрерывного действия представлена на рис. 5.10.

В первом режиме при малых скоростях транспортирования $v = 1$ до тех пор, пока $\tau_a \geq 0,4$, что соответствует

$$v_{L1} \leq D l_a / (0,4 R_a^2),$$

где l_a — длина камеры адсорбции; R_a — радиус частицы адсорбента. Быстрота откачки $S_H = S_{\max}$ в этом режиме пропорциональна v_L .

Во втором режиме при средних скоростях транспортирования адсорбент не успевает насыщаться откачиваемым газом, $v < 1$ и быстрота действия насоса пропорциональна $\sqrt{v_L}$

$$S_H = \frac{3,4 F K_{T2}}{R_a} \sqrt{D l_a v_L} \left(1 - \frac{K_{T1} p_2}{K_{T2} p_1} \right).$$

Третий режим работы насоса при больших скоростях транспортирования начинается со скорости, определяемой коэффициентом температуропроводности адсорбента a и безразмерным временем охлаждения $F_0 = 0,8$:

$$v_{L2} = a l_{\text{ox}} / (R^2_{\text{сл}} \cdot 0,8),$$

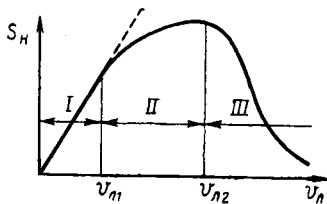


Рис. 5.10. Зависимость скорости действия адсорбционного насоса непрерывного действия от скорости транспортирования адсорбента

где l_{ox} — длина камеры охлаждения; $R_{сл}$ — характерный размер слоя. При скоростях транспортирования, больших $v_{л2}$, адсорбент не успевает охлаждаться и быстрота откачки насоса резко падает. Таким образом, $v_{л2}$ является оптимальной скоростью транспортирования адсорбента в насосе, обеспечивающей получение максимальной быстроты откачки насоса.

§ 5.7. Конструкции криогенных насосов

Рассмотрим основные конструктивные варианты криогенных насосов. Для работы в низком вакууме используются насосы погружного типа (рис. 5.11, а), а для работы в высоком вакууме — заливного типа (рис. 5.11, б). Адсорбент 1 для предотвращения загрязнения и улучшения условий охлаждения помещается внутри пористого металлического фильтра 2. Нагреватель 3 служит для регенерации адсорбента после его насыщения откачиваемым газом. Разница в конструкции насосов погружного и заливного типов со-

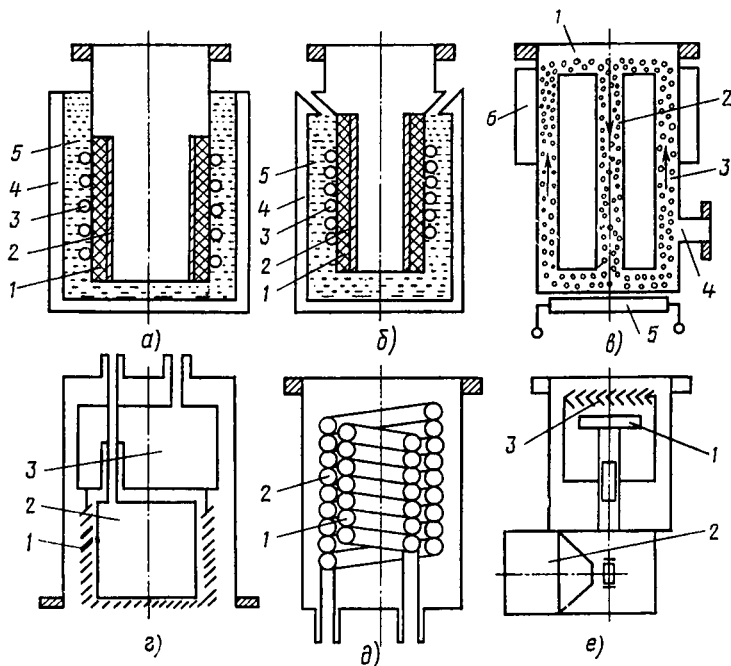


Рис. 5.11. Конструктивные схемы криогенных насосов

стоит в том, что сосуд Дьюара 4 для размещения криоагената 5 в насосах погружного типа выполняется съемным, а в насосах заливного типа в качестве теплоизоляции между стенками насоса и сосудом с криоагентом используется вакуум, создаваемый самим насосом. В качестве криоагентов используются сжиженные газы (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Свойства сжиженных газов

Параметры	N ₂	Ne	H ₂	He
Температура кипения при атмосферном давлении, К	77,3	27,2	20,4	4,2
Плотность в жидком состоянии, г/см ³	0,81	1,18	0,07	0,13
Теплота парообразования, кДж/л	162	102	31,7	2,7
Скорость испарения при тепловой нагрузке 1 Вт, л/ч	0,021	0,035	0,16	1,4

Схемы криоадсорбционных насосов с неподвижным адсорбентом конструктивно просты, но требуют дополнительной арматуры и дублирования откачных средств для обеспечения непрерывного процесса откачки, имеют высокие эксплуатационные расходы криоагента и электроэнергии на изменение температуры не только самого адсорбента, но и корпуса насоса. Характеристики промышленных адсорбционных насосов приведены в табл. П.8.

Схема криоадсорбционного насоса с движущимся адсорбентом (рис. 5.11, в) обеспечивает постоянство быстроты откачки и предельного давления независимо от времени работы насоса. Адсорбент движется по замкнутому контуру с линейной скоростью $v_{л.}$, проходя на своем пути камеру адсорбции 1, шлюз 2, нагреватель 5, камеру десорбции 4, шлюз 3, холодильник 6, и вновь попадает в камеру адсорбции.

Криоконденсационные насосы заливного типа имеют конструктивную схему рис. 5.11, г. В полость 2 заливается низкотемпературный криоагент (жидкий гелий или водород), а в полость 3 — высокотемпературный криоагент (жидкий азот). Экраны 1 защищают поверхность сосуда низкотемпературным криоагентом от излучения стенок насоса, не препятствуя проникновению откачиваемого газа к охлажденной поверхности. Очень часто в криоконденсационных насосах используется адсорбционный способ поглощения неконденсирующихся газов, для чего поверхность сосуда с низкотемпературным криоагентом покрывается адсорбентом в виде пористой оксидной пленки (или в процессе работы насоса на ней осаждается пористый слой хорошо конденсируемых газов).

Криоконденсационные насосы испарительного типа (рис. 5.11, д) имеют криопанели в виде змеевиков, по которым циркулируют па-

ры криоагента, испаряющегося из сосуда Дьюара. Циркуляция может осуществляться за счет создания избыточного давления в сосуде Дьюара или всасывающего действия механического вакуумного насоса. Испаряющийся в криопанели 1 криоагент используется для охлаждения внешнего экрана 2, защищающего криопанель от излучения стенок насоса.

Криосорбционные насосы могут снабжаться автономными криогенераторами (рис. 5.11, е), в которых криопанель 1 охлаждается от автономной газовой машины 2, а экран 3 служит для уменьшения притока теплоты к криопанели.

Для откачки широко применяются адсорбенты с большой площадью внутренней поверхности активные угли, цеолиты, силикагели.

Активные угли — пористые углеродные адсорбенты, которые получают из торфа, каменного угля, опилок и других видов органического сырья путем термической обработки без доступа воздуха для удаления воды и смол с последующей активацией окислением при температуре около 900°C в присутствии CO_2 . Так как поверхность углерода электронейтральна, то адсорбция на углях в основном определяется дисперсионными силами взаимодействия. Активные угли имеют поры различных размеров. Площадь поверхности активных углей при насыпной плотности $0,5 \text{ г/см}^3$ может достигать $2000 \text{ м}^2/\text{г}$.

Цеолиты — это алюмосиликаты, содержащие в своем составе SiO_2 и Al_2O_3 , окислы щелочных и щелочноземельных металлов, а также молекулы кристаллической воды. После удаления кристаллической воды термообработкой при $400 \dots 500^{\circ}\text{C}$ в различных типах цеолитов появляется регулярная структура пор размером от 30 до 90 нм. Поверхность цеолитов полярна, и адсорбция во многом зависит от ориентационного эффекта взаимодействия. Цеолиты бывают природные и синтетические, получаемые кристаллизацией исходных компонентов из раствора при температуре 100°C . Активная поверхность цеолитов может достигать $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ при насыпной плотности $0,7 \text{ г/см}^3$.

Силикагель — аморфная форма гидратированного кремнезема ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), получаемого при взаимодействии силикатов щелочных металлов и минеральных кислот. При высушивании гидрогеля кремниевой кислоты образуется структурная сетка из сферических частиц, поверхность пор в которой может достигать $500 \text{ м}^2/\text{г}$ при насыпной плотности $0,7 \text{ г/см}^3$. Размеры пор изменяются от 100 до 700 нм в зависимости от режимов обработки.

Технические характеристики криоадсорбционных насосов представлены в табл. П.9.

§ 5.8. Ионно-сорбционная откачка

При ионно-сорбционной откачке используют два способа поглощения газа: внедрение ионов в объем твердого тела под действием электрического поля и химическое взаимодействие откачиваемых газов с тонкими пленками активных металлов.

Высокоэнергетические ионы или нейтральные частицы, бомбардируя твердое тело, проникают в него на глубину, достаточную для их растворения. Этот способ удаления газа является разновидностью ионной откачки. На рис. 5.12 показано равновесное распределение концентрации при ионной откачке в объеме неограниченной пластины толщиной $2R$, расположенной внутри вакуумной камеры.

Максимальную удельную геометрическую быстроту ионной откачки можно рассчитать по формуле

$$S_r = \mu N_+ / n = \mu i_+ / (nq), \quad (5.22)$$

где μ — коэффициент внедрения ионов; $N_+ = i_+ / q$ — удельная частота бомбардировки; i_+ — плотность ионного тока; q — элементарный электрический заряд; n — молекулярная концентрация газа.

Коэффициент внедрения учитывает частичное отражение и рассеивание, возникающие при ионной бомбардировке. Коэффициент внедрения сильно зависит от температуры тела и слабо — от плотности тока и ускоряющего напряжения. Значение $\mu \rightarrow 1$ наблюдается для Ti, Zr при 300 ... 500 К.

Максимальное значение концентрации растворенного газа при ионной откачке можно определить из условия равновесия газовых потоков:

$$\mu N_+ = N_1 + N_2, \quad (5.23)$$

$$N_1 = D \left(\frac{ds}{dx} \right)_1; \quad N_2 = D \left(\frac{ds}{dx} \right)_2$$

(D — коэффициент диффузии газа в твердом теле). Градиенты концентраций определяются следующими соотношениями:

$$\left(\frac{ds}{dx} \right)_1 = \frac{s_{\max} - s_0}{h}; \quad \left(\frac{ds}{dx} \right)_2 = \frac{s_{\max} - s_0}{2R - h};$$

здесь $h = CE$ — глубина внедрения ионов (E — ускоряющее напряжение); s_{\max} и s_0 — максимальная и начальная концентрации поглощенного газа.

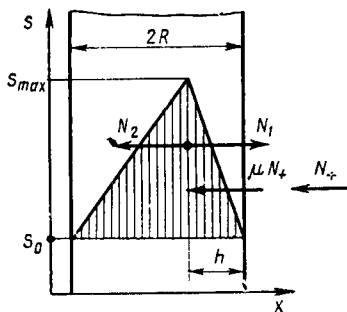


Рис. 5.12. Установившееся распределение концентрации в неограниченной пластине, бомбардируемой высокоэнергетическими ионами

Так как величина h мала по сравнению с $2R$ (константа C даже для легких газов не превышает $1,0$ нм/кВ, то величиной N_2 в уравнении (5.23) можно пренебречь:

$$\mu N_+ \approx D \frac{s_{\max} - s_0}{CE}.$$

Отсюда следует выражение для максимальной концентрации растворенного газа:

$$s_{\max} = s_0 + \frac{\mu N_+ + CE}{D}.$$

Если величина s_{\max} , рассчитанная по приведенной формуле, превышает максимально возможную в данных условиях растворимость газа в металле, то поглощенный газ начинает объединяться в газовые пузырьки, вызывая разрыв металла. Это явление получило название блистер-эффекта.

В нержавеющей стали водородный блистер-эффект наблюдается при поглощении $3 \cdot 10^{-2}$ м³·Па/см², что соответствует при быстрой откачке 10^{-2} м³/(с·см²) и давлении $4 \cdot 10^{-8}$ Па приблизительно 300 ч непрерывной работы.

По известному значению s_{\max} можно подсчитать общее количество газа, которое будет поглощено единицей поверхности: $a = (s_{\max} - s_0)R$.

Во время ионной бомбардировки наблюдается распыление материала, сопровождающееся нанесением тонких пленок на электроды и корпус насоса. Сорбционная активность этих пленок используется для хемосорбционной откачки.

Распыление активного материала может осуществляться независимо от процесса откачки, например с помощью регулирования температуры нагревателя. Расход активного материала в таких насосах осуществляется независимо от потока откачиваемого газа.

Более экономно расходуется активный металл в насосах с саморегулированием распыления. В этих насосах распыление производится ионами откачиваемого газа, бомбардирующими катод, изготовленный из активного материала. Распыляемый материал осаждается на корпус и анод, где осуществляется хемосорбционная откачка.

§ 5.9. Конструкции ионно-сорбционных насосов

Пример конструкции насоса с независимым распылением активного материала представлен на рис. 5.13, а. Насос состоит из корпуса 6, холодильника 5, распылителя 4, управляющей сетки 3, ионизирующей анодной сетки 2, катода 1. Электроны, вылетающие из термокатода, направляются на распылитель и анодную сетку, к которым приложено положительное напряжение в несколько сотен вольт. Электронная бомбардировка распылителя разогревает

его до температуры испарения находящегося на нем активного металла. При этом электроны, направляющиеся к анодной сетке 2, совершают до попадания на нее несколько колебаний, ионизируя путем соударения молекулы остаточных газов. Сетка 3 служит для поддержания постоянства эмиссионного тока при временном отравлении катода.

Ионизированный газ хорошо сорбируется активным металлом, напыленным на поверхность стенки корпуса, и ионной откачкой путем внедрения положительных ионов в материал стенок корпуса. Основные характеристики насосов такого типа приведены на рис. П.4 и в табл. П.7.

Электродная система, обеспечивающая эффективную ионизацию молекул остаточных газов при ионной откачке, используется в конструкции орбитронного насоса (рис. 5.13, б). Электроны, эмиттируемые небольшим вольфрамовым катодом 5, под действием положительного потенциала анода 4 и сеток 1 направляются в пространство ионизации между concentрично расположенными анодом 4 и коллектором ионов 3. Одновременно благодаря наличию присоединенного к катоду специального электрода 2 электронам сообщаются касательные скорости, обеспечивающие движение электронов по круговым траекториям, что в несколько тысяч раз увеличивает пробег электрона по сравнению с расстоянием между катодом и анодом. Положительные ионы, образовавшиеся в результате ионизации остаточных газов, под действием ускоряющего поля внедряются в коллектор ионов, которым может служить корпус насоса. Одновременно с анода, разогретого до температуры испарения электронной бомбардировкой, активный материал напыляется на коллектор ионов, что обеспечивает хемосорбционное поглощение откачиваемого газа и «растворение» поглощенных молекул.

Недостатком этих насосов является то, что скорости распыления активного металла и производительность откачки в таких насосах независимы друг от друга. Это часто приводит к непроизводительному расходу активного металла.

Саморегулирование скорости распыления обеспечивается в магниторазрядном насосе (рис. 5.14, а, б), который состоит из двух катодов 1 и проволочного или цилиндрического анода 2, находящихся в магнитном поле с индукцией B . Магнитное поле направлено по оси анода, который имеет положительный относительно катодов потенциал 3...7 кВ. В диодном магниторазрядном насосе, имеющем

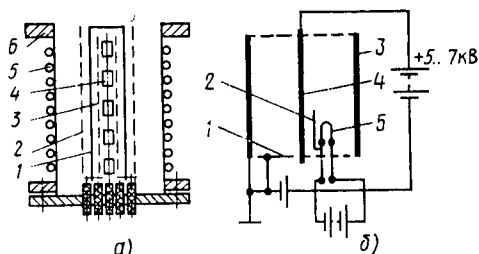


Рис. 5.13. Конструктивные схемы ионно-сорбционных насосов

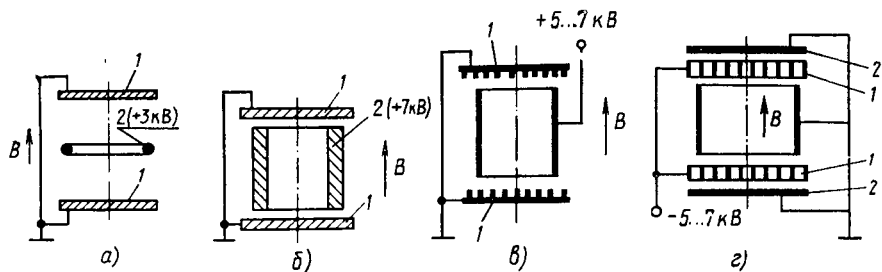


Рис. 5.14. Конструктивные схемы магниторазрядных насосов

большую производительность (рис. 5.15), анод 2 выполнен в виде сотовой рамки, каждая ячейка которой вместе с катодами 3, прикрепленными к корпусу 1, соответствует вместе с магнитом 4 схеме рис. 5.14, б.

Откачиваемые газы ионизируются электронами, появляющимися за счет автоэлектронной эмиссии из катода, и вторичными электронами, возникающими при бомбардировке катода ионами откачиваемого газа.

Напряженность магнитного поля выбирают таким образом, чтобы радиус траектории электронов был меньше радиуса анода. При этом общая длина траектории электрона до его попадания на анод сильно увеличивается, что ведет к возрастанию вероятности ионизации остаточных газов.

Положительные ионы, слабо отклоняющиеся магнитным полем, бомбардируют катод и распыляют активный металл, который осаждается на аноде. Один ион выбивает в среднем один атом активного материала, что и обеспечивает саморегулируемую скорость распыления при работе насоса.

Активные газы химически взаимодействуют с распыляемыми атомами материала катода и осаждаются на анод в виде химических соединений. Инертные газы откачиваются за счет ионной откачки: положительные ионы — внедрением в материал катода, отрицательные ионы и высокоэнергетические нейтральные частицы — на аноде. Основное количество инертных газов откачивается на аноде, так как из катодов в процессе их распыления наблюдается выделение поглощенных газов.

Для повышения эффективности распыления активного материала применяются схемы диодных магниторазрядных насосов с ребристыми катодами (рис. 5.14, в) и триодная схема (рис. 5.14, г) с сетчатым катодом 1. Распыление активного материала в этих насосах ведется с больших поверхностей при малых углах падения ионов. В триодном насосе напыление ведется дополнительно на коллектор 2 (корпус насоса), который не бомбардируется положительными ионами.

Магнитоэридные насосы обладают заметной избирательностью в процессе откачки. Быстрота действия этих насосов при откачке водорода в три раза выше, а кислорода в два раза ниже, чем азота.

Быстрота действия при откачке инертных газов в диодных насосах составляет для гелия 10%, неона — 4%, аргона, криптона и ксенона — 1...2% от быстроты действия при откачке азота. В конструкциях насоса триодного типа и в насосах с ребристыми катодами быстрота действия при откачке аргона повышается до 25 и 10% от быстроты откачки азота.

При длительной откачке аргона в насосе может возникнуть аргонная нестабильность, сопровождающаяся периодическими колебаниями давления.

Магнитная система насосов по соображениям экономичности и надежности выполняется на постоянных магнитах из феррита бария (2БА, 3БА), сплава железа с кобальтом ЮНДК35Г5 и сплава кобальта с самарием. Максимальная температура обезгаживания этих магнитов 150, 500, 150°C.

Предельное давление магнитоэридных насосов 10^{-8} ... 10^{-10} Па. Для облегчения зажигания разряда в насосах при работе в сверхвысоком вакууме используется триггерное устройство на основе радиоактивных изотопов с электронным множителем.

Верхний предел рабочих давлений определяется газовыделением из-за перегрева электродов насоса. При давлениях более 10^{-3} Па длительная работа насоса возможна лишь при дополнительном охлаждении его электродов. Кратковременная работа насоса при его запуске возможна от давления 1 Па.

Наличие загрязнений на электродах насоса, особенно органических, уменьшает быстроту действия насоса и ухудшает предельное давление, поэтому предварительная откачка этих насосов должна обеспечиваться безмасляными средствами откачки.

Магнитоэридными насосами трудно обеспечить большую быстроту откачки из-за малой проводимости корпуса насоса, находящегося в магнитном зазоре.

В связи с этим распространены многосекционные насосы, в которых магнитоэридные секции устанавливаются по образующей корпуса вакуумного насоса. Быстрота откачки такого насоса пропорциональна количеству секций или диаметру входного патрубка насоса.

Массовая удельная характеристика магнитоэридных насосов составляет 0,4 кг/(л/с). Комбинированные испарительные насосы с магнитоэридными секциями, предназначенными для откачки инертных газов, имеют лучшие массовые характеристики, т. е. 0,1 кг/(л/с).

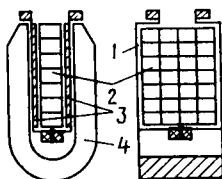


Рис. 5.15. Магнитоэридный насос

Характеристики современных магниторазрядных насосов приведены на рис. П.4 и табл. П.8.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается принцип ионной откачки?
2. Какой из источников, точечный или плоский, обеспечивает большую равномерность толщины пленки, напыляемой на плоскую поверхность?
3. Зачем производят распыление активного материала в испарительных насосах?
4. Почему ионно-сорбционные насосы откачивают инертные газы?
5. Какие конструктивные способы позволяют увеличивать быстроту откачки магниторазрядных насосов?
6. В чем смысл саморегулирования распыления активного вещества в ионно-сорбционных насосах?
7. Чем вызвано ухудшение характеристик криоконденсационного насоса по мере увеличения количества откачанного газа?
8. Какие криоагенты вы знаете? Назовите их рабочие температуры.
9. Какие адсорбционные материалы применяются в конструкциях криоадсорбционных насосов?
10. С чем связано наличие оптимальной скорости транспортирования адсорбента в криоадсорбционных насосах непрерывного действия?

ГЛАВА 6

ИЗМЕРЕНИЕ ОБЩИХ ДАВЛЕНИЙ

§ 6.1. Классификация методов и приборов для измерения общих давлений

Область давлений, используемая в современной вакуумной технике, $10^5 \dots 10^{-12}$ Па. Измерение давлений в таком широком диапазоне не может быть обеспечено одним прибором. В практике измерения давления разреженных газов применяются различные типы преобразователей, отличающиеся по принципу действия и классу точности.

Приборы для измерения общих давлений в вакуумной технике называют **вакуумметрами**. Они обычно состоят из двух частей: манометрического преобразователя и измерительной установки. По методу измерения вакуумметры могут быть разделены на абсолютные и относительные. Показания абсолютных приборов не зависят от рода газа и могут быть заранее рассчитаны. В приборах для относительных измерений используют зависимость параметров некоторых физических процессов, протекающих в вакууме, от давления. Они нуждаются в градуировке по образцовым приборам. Вакуумметры измеряют общее давление газов, присутствующее



Рис. 6.1. Диапазон рабочих давлений вакуумметров

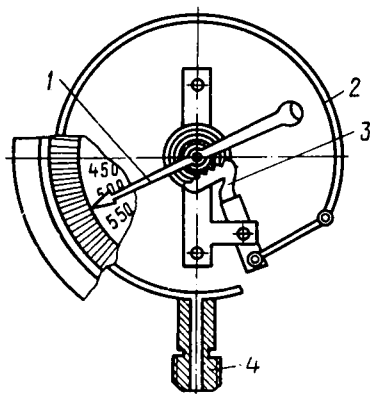


Рис. 6.2. Деформационный трубчатый преобразователь (трубка Бурдона)

щих в вакуумной системе. На рис. 6.1 показаны диапазоны рабочих давлений различных типов вакуумметров.

§ 6.2. Деформационные преобразователи

К деформационным преобразователям относятся трубчатые и мембранные преобразователи.

Трубка Бурдона (рис. 6.2) — деформационный манометр в виде спиральной трубки 2, скручивающейся под действием атмосферного давления в случае откачки внутренней полости за счет разных радиусов кривизны, а следовательно, и площадей наружной и внутренней поверхностей трубки.

Подсчитаем силы F_1 и F_2 , действующие соответственно на поверхности с большим и меньшим радиусами:

$$F_1 = (p_{\text{атм}} - p) A_1; \quad F_2 = (p_{\text{атм}} - p) A_2,$$

где $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление; p — давление в трубке; A_1 и A_2 — площади наружной и внутренней поверхностей участка спиральной трубки.

Измерительное уравнение связывает между собой перемещение конца трубки x и разность давлений $p_{\text{атм}} - p$ соотношением

$$\Delta F = F_1 - F_2 = (p_{\text{атм}} - p) (A_1 - A_2) = cx,$$

где c — жесткость трубки.

Манометр измеряет давления в пределах $10^5 \dots 10^3$ Па. Измерение давлений ниже 10^3 Па затруднено тем, что трубка при малой жесткости должна быть достаточно прочной, чтобы выдержать атмосферное давление. Погрешность измерения равна 5% и ограничена упругим последствием трубки — медленным возвращением трубки в исходное положение после упругой деформации.

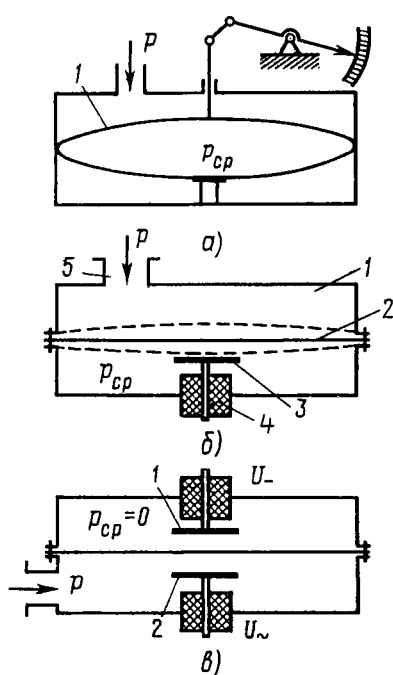


Рис. 6.3. Деформационные мембранные преобразователи

новый метод регистрации перемещения. Мембрана 2 в этом приборе герметично разделяет корпус 1 на две камеры, в одной из которых поддерживается сравнительное давление p_{cp} , а другая присоединяется патрубком 5 к вакуумной системе. Через изолятор 4 в нижнюю камеру вводится электрод 3, образующий с мембраной конденсатор, емкость которого является функцией давления. Этот преобразователь может измерять абсолютное давление в вакуумной системе, если $p_{cp} = 0$.

Мембранный преобразователь с двумя электродами (рис. 6.3, в) работает при нулевой деформации мембраны. На электрод 2 подается переменное напряжение, позволяющее определить емкость и положение мембраны. На электрод 1 прикладывается постоянное напряжение, которое за счет электростатических сил возвращает мембрану к исходному положению, компенсируя воздействие разности давлений. Разность давлений в этом приборе пропорциональна квадрату постоянного напряжения, приложенного к электроду 1.

Диапазон измерения мембранных преобразователей $10^5 \dots 10^{-1}$ Па. Но так как линейность показаний сохраняется только при

К вакуумной системе манометр подключается через штуцер 4. Регистрация перемещения спиральной трубки обычно рычажно-стрелочная, когда конец спиральной трубки связан через зубчатый сектор 3 со стрелкой 1.

Деформационные мембранные преобразователи различаются в зависимости от способа регистрации перемещения мембраны и метода измерения. В барометрах используется схема, показанная на рис. 6.3, а. Внутри герметичной полости, образованной мембранами 1, создается сравнительное давление p_{cp} . Если измеряемое давление p не равно p_{cp} , то происходит деформация мембран и перемещение стрелки, пропорциональное разности давлений $(p_{cp} - p) = kx$, где k — коэффициент пропорциональности.

Такой прибор измеряет разность давлений и поэтому называется дифференциальным.

На этом же принципе работает мембранный преобразователь (рис. 6.3, б), но в нем применен емкостный метод регистрации перемещения.

небольших деформациях мембраны, то один прибор может измерять давления, лежащие в пределах 2... 3 порядков.

Нижний предел измерения ограничивается температурными деформациями, минимальной жесткостью и прочностью мембраны. Преобразователи с электростатической компенсацией деформации мембраны имеют более стабильные характеристики.

§ 6.3. Гидростатические преобразователи

Простейшими гидростатическими преобразователями являются жидкостные манометры с открытым и закрытым коленом. Измеряемая этими манометрами разность давлений p и $p_{ср}$ уравновешивается весом столба жидкости высотой h :

$$(p_{ср} - p) = g\rho h.$$

где g — ускорение земного притяжения; ρ — плотность жидкости.

Манометры с открытым коленом (рис. 6.4, а) удобны для измерения давлений, близких к атмосферному. В этом случае $p_{ср} = p_{атм}$ и высота столба h минимальна. Показания такого манометра зависят от атмосферного давления.

В манометре с закрытым коленом (рис. 6.4, б) перед заполнением рабочей жидкостью получают давление $p_{ср} \approx 0$, что позволяет непосредственно измерять абсолютное давление газа в вакуумной системе. В этом случае показания прибора не зависят от атмосферного давления. При измерении малых давлений (менее $2 \cdot 10^4$ Па) манометр с закрытым коленом имеет меньшие габариты, чем манометр с открытым коленом.

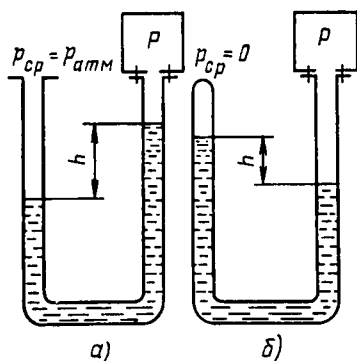


Рис. 6.4. Жидкостные манометры:

а — с открытым коленом; б — с закрытым коленом

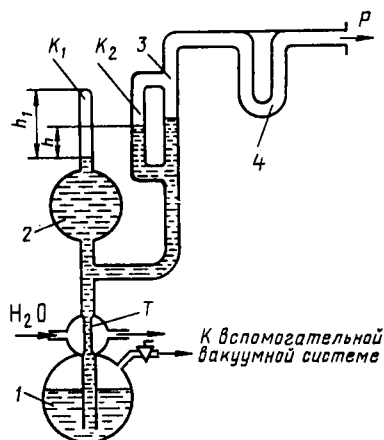


Рис. 6.5. Компрессионный манометр

В качестве рабочей жидкости для заполнения рассмотренных манометров применяют ртуть и масло. Масляные манометры имеют большую чувствительность, так как плотность масла примерно в 15 раз меньше плотности ртути. Однако масло хорошо растворяет газы, и перед работой требуется его тщательное обезгаживание.

Пределы измерения ртутных манометров $10^5 \dots 10^3$ Па, а масляных — $10^5 \dots 10^0$ Па. Погрешность при отсчете уровня h может быть доведена до 0,1 мм. Более точное измерение уровня не имеет смысла из-за непостоянства величины поверхностного натяжения, колебаний плотности, температурных градиентов рабочей жидкости и т. д. Чувствительность манометров к перепаду давлений в основном ограничивается вязкостью самой жидкости.

Гидростатические манометры с предварительным сжатием газа называются компрессионными. Компрессионный манометр (рис. 6.5) состоит из измерительного баллона 2 с капилляром K_1 , резервуара со ртутью, соединительного трубопровода 3 с капилляром K_2 . Через азотную ловушку 4 манометр подключается к вакуумной системе. Баллон 2 перед началом измерений соединяется с вакуумной системой через трубку 3. Из баллона 1 под давлением атмосферного воздуха ртуть поднимается вверх по трубке T , отключает баллон 2 от вакуумной системы и сжимает заключенный в баллоне газ до давления, которое можно непосредственно измерить по разности уровней ртути в закрытом и сравнительном капиллярах K_1 и K_2 . После компрессии давление измеряется точно так же, как и в обычном ртутном манометре с закрытым коленом.

Уравнение компрессионного манометра на основании закона Бойля — Мариотта имеет следующий вид:

$$pV_0 = (p + \rho gh) V, \quad (6.1)$$

где p — измеряемое давление; V_0 — начальный объем сжимаемого газа; h — разность уровней в сравнительном и закрытом капиллярах;

$V = \frac{\pi d_k^2}{4} h_1$ — конечный объем газа после сжатия; d_k — диаметр капилляров.

Решая (6.1) относительно давления p , получим

$$p = \frac{\pi \rho g d_k^2 h h_1}{4 (V_0 - \pi d_k^2 h_1 / 4)}.$$

При условии, что $h_1 \pi d_k^2 / 4$ значительно меньше V_0 ,

$$p = \frac{\pi d_k^2}{4 V_0} h h_1, \quad (6.2)$$

Если ртуть в закрытом капилляре манометра всегда поднимать до одного и того же уровня, то h_1 будет величиной постоянной и уравнение (6.2) можно записать так: $p = C_1 h$; $C_1 = \pi d_k^2 h_1 / (4 V_0)$.

Этот способ измерения давления называется методом линейной шкалы.

Для расширения пределов измерения можно пользоваться методом квадратичной шкалы, при котором сжатие в манометре производится так, чтобы ртуть в сравнительном капилляре K_2 всегда устанавливалась на одном уровне с запаянным концом закрытого капилляра K_1 . При этом $h=h_1$. Тогда уравнение (6.2) можно записать в виде $p=C_2h^2$; $C_2=\pi d_k^2/(4V_0)$.

Диапазон измерения компрессионных манометров $10^1 \dots 10^{-3}$ Па. Трудности в измерении более низких давлений связаны с непостоянством капиллярной депрессии ртути (понижение уровня ртути в капилляре по сравнению с ее уровнем в сообщающемся с капилляром широком сосуде); откачивающим действием струи ртутного пара из манометра в ловушку; отличием формы конца запаянного капилляра от формы мениска ртути, что ограничивает минимальное значение на уровне 5... 10 мм. Кроме того, по технологическим соображениям диаметр капилляров удобно выбирать не меньше 1 мм, а объем измерительного баллона определяется прочностью стекла и обычно не превышает 1 л, что дает максимальное значение коэффициента компрессии $2,5 \cdot 10^5$.

Для измерения более высоких давлений требуется манометр с очень длинными (или переменными по сечению) капиллярами. В области давлений более 10 Па можно пользоваться обычными гидростатическими манометрами без предварительного сжатия газа. Для уменьшения откачивающего действия струи ртутного пара трубка T сделана в виде капилляра, охлаждаемого водой.

Компрессионный манометр относится к абсолютным приборам и используется в качестве образцового для градуировки других приборов. Его показания не зависят от рода газа.

Однако компрессионным манометром нельзя измерить давление паров тех веществ, у которых упругость насыщенных паров при температуре измерения меньше давления в измерительном капилляре после сжатия; нельзя проводить непрерывное измерение давления. Недостатком манометра является также то, что он должен присоединяться к вакуумной системе через азотную ловушку.

§ 6.4. Тепловые преобразователи

Принцип действия тепловых преобразователей основан на зависимости теплопередачи через разреженный газ от давления. Передача теплоты происходит от тонкой металлической нити к баллону, находящемуся при комнатной температуре. Металлическая нить нагревается в вакууме путем пропускания электрического тока.

Уравнение теплового баланса такого прибора можно представить в следующем виде:

$$I_n^2 R = E_k + E_t + E_n + E_m, \quad (6.3)$$

где I_n — ток, проходящий через нить; R — сопротивление нити; E_k ,

E_T, E_n, E_m — потери теплоты за счет конвекции, теплопроводности газа, излучения нити и теплопроводности материала нити.

Конвективным теплообменом в области среднего и высокого вакуума можно пренебречь, т. е. $E_n \approx 0$, а потери теплоты излучением

$$E_n = K_n (T_n^4 - T_0^4) A;$$

здесь A — поверхность нити; K_n — коэффициент излучения материала нити; T_n и T_0 — температуры нити и баллона.

Тепловые потери нити за счет передачи теплоты по материалам нити и электродов, соединяющих нить с корпусом преобразователя,

$$E_m = b (T_n - T_0) f,$$

(b — коэффициент теплопроводности материала нити; f — сечение нити). Потери теплоты через газовый промежуток

$$E_T = \lambda (T_n - T_0) A, \quad (6.4)$$

где $\lambda = \frac{Ap}{p+B}$ — коэффициент теплопроводности газа [см. (3.27)].

В области низкого вакуума $p \gg B$, а коэффициент теплопроводности газа не зависит от давления. Давление $p \approx B$, соответствующее переходу от среднего в низкий вакуум, является верхним пределом измерения теплового манометра. В области высокого вакуума, когда $p \ll B$, коэффициент теплопроводности пропорционален давлению и при $\alpha = 1$ из (3.25) следует

$$\lambda_n = K_T p. \quad (6.5)$$

Измерительное уравнение теплового преобразователя с учетом уравнений (6.3), (6.4), (6.5) можно записать так:

$$p = \frac{I_n^2 R - (E_n + E_m)}{K_T (T_n - T_0)}. \quad (6.6)$$

Для точного измерения давления необходимо, чтобы E_T составляло значительную долю от $E_n + E_m$, т. е. чтобы сумма $E_n + E_m$ была существенно меньше мощности $I_n^2 R$, выделяющейся в нити манометра. Поэтому условие $I_n^2 R - (E_n + E_m) \geq 0,01 I_n^2 R$ определяет нижний предел измерения манометра.

Из уравнения (6.6) видно, что давление является функцией двух переменных: тока накала нити I_n и температуры нити T_n .

Существует два метода работы тепловых манометров: постоянной температуры нити и постоянного тока накала. Градуировочные кривые теплового манометра, показанные на рис. 6.6, а, б для обоих методов работы, представляют собой в средней части параболу и гиперболу. Концы градуировочных кривых у верхнего и нижнего пределов измерения не описываются уравнением (6.6) и переходят

дят в линии, параллельные оси давления.

Для расширения верхнего предела измерения теплового преобразователя следует уменьшать его габариты, что увеличивает отношение L/d и сдвигает границу низкого вакуума в сторону более высоких давлений.

Зависимость коэффициента конвективного теплообмена от давления используется для измерения давлений в области низкого вакуума. Недостатком этого способа является зависимость показания прибора от его положения в пространстве.

Нижний предел измерения тепловых преобразователей можно улучшить уменьшая долю $(E_n + E_m)$ в сумме тепловых потерь нити. Это может быть достигнуто понижением температуры нити и уменьшением диаметра вводов, соединяющих нить с баллоном.

Показания тепловых преобразователей определяются соотношением $K_T p$ и зависят от рода газа. Преобразователь будет давать одинаковые показания при выполнении следующих условий:

$$p_1 K_{T1} = p_2 K_{T2} \dots p_i K_{Ti} = \dots = p_n K_{Tn}$$

Выпускаемые промышленностью приборы проградуированы по сухому воздуху. Если необходимо измерить давление других газов, то нужно учитывать относительную чувствительность прибора к данному газу

$$p_i = p_v \frac{K_{Tv}}{K_{Ti}} = p_v q_i, \quad (6.7)$$

где p_v и K_{Tv} — давление и коэффициент теплопроводности воздуха; $q_i = K_{Tv}/K_{Ti}$ — коэффициент относительной чувствительности теплового преобразователя к данному газу.

Значения q_i для различных газов по отношению к воздуху могут отличаться в несколько раз (см. табл. 3.3).

Если преобразователь измеряет давление смеси газов, то его показания будут выражены в воздушном эквиваленте p_v :

$$p_1 K_{T1} + p_2 K_{T2} + \dots + p_n K_{Tn} = p_v K_{Tv}. \quad (6.8)$$

Так как из определения относительной чувствительности (6.7) следует, что $p_v = p_{см}/q_{см}$, то выражение (6.8) можно записать в виде $p_{см}/q_{см} = p_1/q_1 + p_2/q_2 + \dots + p_n/q_n$.

Разделив обе части уравнения на $p_{см}$, получим

$$\frac{1}{q_{см}} = \frac{V_1}{q_1} + \frac{V_2}{q_2} + \dots + \frac{V_n}{q_n},$$

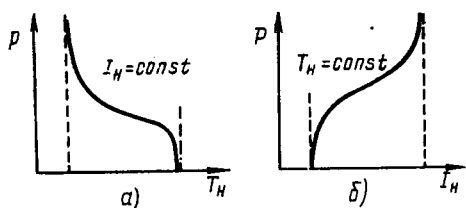


Рис. 6.6. Градуировочные кривые теплового преобразователя:

а — при постоянном токе накала; б — при постоянной температуре нити

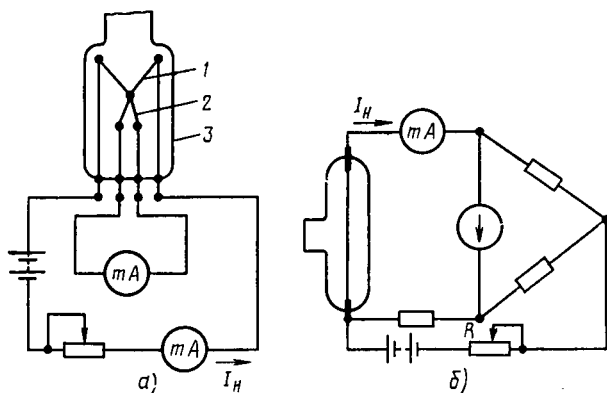


Рис. 6.7. Схемы тепловых преобразователей:
 а — термопарного; б — преобразователя сопротивления

где V_1, \dots, V_n — объемные концентрации соответствующих газов, причем $\sum_{i=1}^n V_i = 1$. Таким образом, коэффициент относительной чувствительности для смеси газов определяется по формуле

$$1/q_{см} = \sum_{i=1}^n V_i/q_i. \quad (6.9)$$

Тепловые преобразователи в зависимости от способа измерения температуры делятся на термопарные и преобразователи сопротивления.

В *термопарном преобразователе* (рис. 6.7, а) температура нити 1 измеряется термопарой 2. Электроды расположены в стеклянном или металлическом баллоне 3, имеющем патрубок для подключения к вакуумной системе. Термо-ЭДС термопары измеряется милливольтметром, ток накала нити регулируется реостатом и измеряется миллиамперметром.

В преобразователе *сопротивления* для измерения температуры используется зависимость сопротивления нити от температуры. Он включается в мостовую схему (рис. 6.7, б). Ток накала нити измеряется миллиамперметром, включенным в то же плечо моста, что и преобразователь, а температура нити — по току гальванометра в измерительной диагонали моста. Ток накала регулируется реостатом.

Оба преобразователя могут работать как в режиме постоянного тока накала, так и в режиме с постоянной температурой нити.

Преимуществом тепловых преобразователей является то, что они измеряют общее давление всех газов и паров, присутствующих в вакуумной системе, и обеспечивают непрерывность измерения

давления. Инерционность показаний, связанная с тепловой инерцией нити, изменяется от нескольких секунд при низких давлениях до нескольких миллисекунд при высоких давлениях.

Тепловые преобразователи как приборы для относительных измерений давления обычно градуируются по компрессионному манометру. Диапазон рабочих давлений $5 \cdot 10^3 \dots 10^{-1}$ Па. Характеристики современных тепловых вакуумметров представлены в табл. П.10.

§ 6.5. Электронные преобразователи

Принцип действия электронных преобразователей основан на пропорциональности между давлением и ионным током, образовавшимся в результате ионизации термоэлектронами остаточных газов.

Существует две схемы электронного преобразователя: с внутренним и внешним коллектором.

Схема с *внутренним* коллектором (рис. 6.8, а) аналогична обычному триоду. Коллектором ионов является сетка, на которую относительно катода подается отрицательное напряжение в несколько десятков вольт, а на анод — положительное напряжение 100—200 В. Электроны на пути от катода к аноду (ток I_e) соударяются с молекулами остаточных газов, и образовавшиеся положительные ионы попадают на сетку, создавая ионный ток $I_{и}$, измеряемый гальванометром.

В схеме с *внешним* коллектором (рис. 6.8, б) потенциалы сетки и анода меняются местами, и коллектором становится анод. Электроны, летящие от катода к сетке, совершают вокруг ее витков ряд колебаний, что увеличивает длину траектории электронов и повышает вероятность ионизации молекул остаточных газов. Это делает схему с внешним коллектором более чувствительной, несмотря на то что часть положительных ионов, образовавшихся между сеткой и катодом, не участвует в измерении давления.

Рассмотрим уравнение электронного преобразователя

$$dN = npe dr, \quad (6.10)$$

где dN — число положительных ионов; n — число электронов; dr — элементарная длина траектории электронов; e — эффективность ионизации, равная количеству положительных ионов, образуемых одним электроном на единице пути при единичном давлении (см. рис. 3.4).

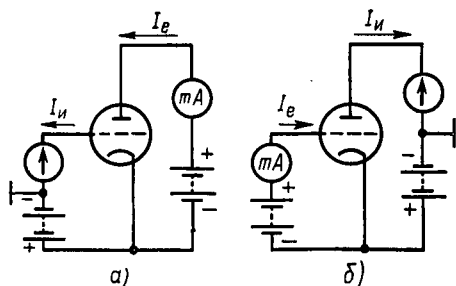


Рис. 6.8. Схемы электронных преобразователей:
а — с внутренним коллектором; б — с внешним коллектором

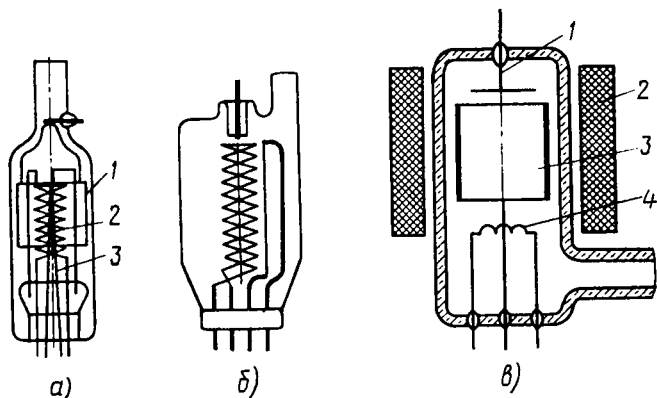


Рис. 6.9. Конструктивные схемы электронных преобразователей:

a — с внешним коллектором; *б* — с осевым коллектором; *в* — с магнитным полем

Если ввести в (6.10) электронный ток $I_e = n/t$, то

$$dN/t = I_e p \varepsilon dr. \quad (6.11)$$

Интегрируя (6.11) по всей длине траектории электрона с энергией, большей потенциала ионизации, получим выражение для ионного тока

$$I_n = I_e p \int_{r_1}^{r_2} \varepsilon dr,$$

которое перепишем в виде

$$I_n = K_n I_e p \quad (6.12)$$

$\left(K_n = \int_{r_1}^{r_2} \varepsilon dr \right)$ — чувствительность электронного манометра).

Из выражения (6.12), называемого уравнением электронного преобразователя, очевидно, что, для того чтобы измеряемый ионный ток был пропорционален давлению, необходимо во время измерения поддерживать постоянное значение электронного тока. Тогда $a = I_e K_n$ — постоянная электронного манометра — равна тангенсу угла наклона градуировочной кривой $I_n(p)$ к оси давления.

Схематично конструкция электронного преобразователя с внешним коллектором представлена на рис. 6.9, *a*. Коллектор ионов 1 имеет форму цилиндра с электрическим вводом в верхней части баллона, сетка 2 — форму двойной спирали с двумя выводами для обезгаживания путем пропускания электрического тока. Катод 3

вольфрамовый. Постоянная a при токе эмиссии 5 мА для типового преобразователя составляет $\sim 10^{-3}$ А/Па. Пределы давлений, которые могут быть измерены таким манометрическим преобразователем, составляют $1 \dots 10^{-5}$ Па.

Верхний предел измерения типового электронного преобразователя равен ~ 1 Па и соответствует нарушению линейности градуировочной характеристики, когда средняя длина свободного пути электрона в объеме прибора становится меньше пути электрона между электродами. Для расширения верхнего предела можно уменьшить расстояние между электродами. Существуют приборы, верхний предел которых таким путем удалось довести до 10^2 Па. Чтобы катод не сгорел при таких высоких давлениях, его изготавливают из оксидов редкоземельных металлов.

Нижний предел измерения определяется фоновыми токами в цепи коллектора, возникающими из-за эмиссии фотоэлектронов в результате мягкого рентгеновского излучения анодной сетки и ультрафиолетового излучения накаливаемого катода. Рентгеновское излучение анодной сетки является результатом ее бомбардировки электронами. Автоэлектронная эмиссия коллектора появляется под действием разности потенциалов 200—300 В между коллектором и анодной сеткой и вносит дополнительную составляющую в фоновый ток.

Фоновые электронные токи имеют одинаковое направление с ионным током и поэтому оказывают одинаковое воздействие на измерительные приборы. Максимальным фоновым током является ток рентгеновского излучения, пропорциональный эмиссионному току: $I_{\text{ф}} = K_s I_e$, где K_s — коэффициент пропорциональности.

С учетом фоновых токов рентгеновского излучения уравнение электронного преобразователя можно записать в следующем виде: $I = I_{\text{и}} + I_{\text{ф}} = I_e (K_s + K_{\text{и}} \rho)$, а нижний предел измерения — определить соотношением ионного и фонового токов: $I_{\text{и}}/I_{\text{ф}} = K_{\text{и}}/(K_s \rho)$.

Таким образом, для расширения нижнего предела измерения нужно при постоянном давлении ρ увеличить $K_{\text{и}}$ или уменьшить K_s .

Для уменьшения фоновых токов и, следовательно, постоянной K_s был предложен преобразователь с осевым коллектором (рис. 6.9, б), в котором катод и коллектор поменялись местами. Это значительно уменьшило телесный угол, в котором рентгеновское излучение сетки попадает на коллектор. Это привело к уменьшению K_s приблизительно в 10^3 раз по сравнению с конструкцией рис. 6.9, а и расширило нижний предел измерения давления до 10^{-8} Па.

Чувствительность $K_{\text{и}}$ можно увеличить, если поместить преобразователь в магнитное поле (рис. 6.9, в). Электроны от катода к аноду в этом случае движутся по спирали. В электронном преобразователе с магнитным полем, создаваемым катушкой 2 и направленным параллельно оси анода 3, катод 4 — термоэлектронный, а коллектор 1 расположен в верхней части баллона. Такой преобразователь за счет увеличения чувствительности имеет ниж-

ний предел на 2...3 порядка ниже, чем конструкция преобразователя, показанная на рис. 6.9, а.

Электронный преобразователь имеет неодинаковую чувствительность к различным газам, так как эффективность ионизации зависит от рода газа.

Если преобразователь проградуирован по воздуху, а применяется для измерения давления других газов, то необходимо учитывать относительную чувствительность R . Из условия равенства ионных токов запишем $K_1 p_1 = K_2 p_2 = \dots = K_i p_i = K_B p_B$, откуда $p_i = p_B / R_i$, где $R_i = K_i / K_B$ — относительная чувствительность к данному газу. Относительные чувствительности электронного преобразователя представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Относительная чувствительность преобразователей

Тип преобразователя	N ₂	H ₂	He	Ar	CO ₂	O ₂
Электронный	1	0,43	0,16	1,3	1,6	0,85
Магнитный	1	0,43	0,15	1,4	1,3	0,86
Радиоизотопный	1	0,23	0,21	1,2	1,5	—

Продолжение табл. 6.1

Тип преобразователя	Hg	CH ₄	Xe	Ne	CO	H ₂ O	Ацетон
Электронный	2,5	1,5	2,8	0,27	1,04	—	—
Магнитный	—	—	3,5	0,26	—	—	—
Радиоизотопный	—	—	—	—	—	0,88	2,7

При измерении давления смеси газов из условия равенства ионных токов имеем $K_{см} p_{см} = K_1 p_1 + K_2 p_2 + \dots + K_n p_n$.

Поделив полученное уравнение на K_B , получим

$$\frac{K_{см} p_{см}}{K_B} = R_1 p_1 + R_2 p_2 + \dots + R_n p_n,$$

откуда

$$R_{см} = \sum_{i=1}^n R_i V_i; \quad V_i = p_i / p_{см}.$$

Быстрота откачки электронных преобразователей составляет $10^{-3} \dots 10^{-1}$ л/с, что в закрытых конструкциях преобразователей, присоединяемых через трубку с малой проводимостью, может привести к заметным ошибкам измерения. Дополнительные источники погрешности измерения связаны с химическим взаимодействием

вием газов с накаливаем катодом и ионной десорбцией под воздействием электронной бомбардировки газов, химически поглощенных анодом. Технические характеристики современных вакуумметров с электронными преобразователями даны в табл. П.10.

§ 6.6. Магнитные преобразователи

Принцип действия магнитных преобразователей основан на зависимости тока самостоятельного газового разряда в скрещенных магнитном и электрическом полях от давления. Электродные системы, обеспечивающие поддержание самостоятельного газового разряда при высоком и сверхвысоком вакууме, бывают нескольких видов.

Ячейка Пеннинга (рис. 6.10, а) состоит из двух дисковых катодов 1 и цилиндрического анода 2; в магнетронном преобразователе (рис. 6.10, б) в отличие от ячейки Пеннинга катоды соединены между собой центральным стержнем; в инверсно-магнетронном преобразователе (рис. 6.10, в) центральный стержень выполняет роль анода, а наружный цилиндр становится катодом.

Все электроды находятся в постоянном магнитном поле. На анод подается положительное относительно катода напряжение 2...6 кВ, катод заземлен и соединяется с входом усилителя постоянного тока.

Электроны, вылетающие из катода в результате автоэлектронной эмиссии, в магнетронном или инверсно-магнетронном преобразователе движутся в скрещенных электрическом и магнитном полях по циклоиде, образованной окружностью диаметром $D = 2m|E|/(qB^2)$, катящейся по окружности радиуса r с угловой частотой вращения $\omega = qB/m$ и тангенциальной скоростью $v_{\tau} = E/B$ (E — напряженность электрического поля; B — магнитная индукция; m и q — масса и заряд электрона). В ячейке Пеннинга электроны движутся по спиральным траекториям между катодными пластинами.

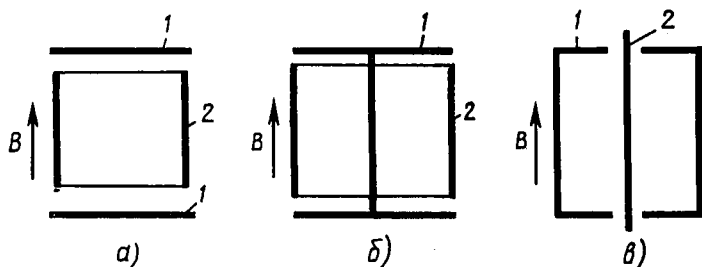


Рис. 6.10. Электродные системы магнитных преобразователей:

а — ячейка Пеннинга; б — магнетронная; в — инверсно-магнетронная

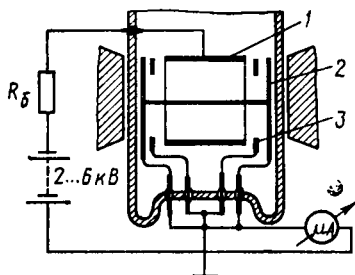


Рис. 6.11. Схема магнетронного преобразователя с уменьшенными фоновыми токами

Магнитная индукция B выбирается больше критического значения, соответствующего равенству диаметра электрода и диаметра окружности, по которой движется электрон, и составляющего в современных приборах $\sim 0,1$ Тл.

При соударении с молекулой остаточного газа электрон теряет часть энергии на ее ионизацию и перемещается в радиальном направлении к аноду. В связи с тем что радиальная скорость электронов значительно меньше, чем тангенциальная, при низ-

ких давлениях в разрядном промежутке образуется отрицательный объемный заряд.

Положительные ионы, образовавшиеся в результате столкновения с электронами, движутся к катоду. Так как их масса значительно больше, чем у электрона, то магнитное поле практически не влияет на траекторию движения ионов. Соударение положительных ионов с катодом приводит к появлению вторичных электронов, ток которых пропорционален ионному току.

Таким образом, разрядный ток магнитного преобразователя $I_p = I_\phi + I_i + I_v$, где I_ϕ — фоновый ток автоэлектронной эмиссии; I_i — ионный ток; I_v — ток вторичной электронной эмиссии.

Ток автоэлектронной эмиссии не зависит от давления и потому может считаться фоновым током; ионный и ток вторичной электронной эмиссии зависят от давления: $I_i + I_v = ar^n$, где $a = 10^{-2} \dots 10^{-1}$ А/Па и $n = 1 \dots 1,4$ — постоянные.

Учитывая эту зависимость и пренебрегая фоновым током, получим измерительное уравнение магнитного преобразователя $I_p = K_{иp}$; здесь $K_{и} = ar^{n-1}$ — чувствительность прибора. Разрядный ток магнитного преобразователя нелинейно зависит от давления.

Верхний предел измерения связан с ограничением максимального разрядного тока балластным сопротивлением, защищающим измерительный прибор от возникновения дугового разряда. Для расширения верхнего предела измерения следует уменьшить анодное напряжение и размеры разрядного промежутка. Обычно верхний предел измерения находится в области давлений $10 \dots 100$ Па.

Нижний предел измерения определяется временем зажигания разряда и значением фонового тока. В современных приборах он составляет 10^{-11} Па. Для уменьшения фонового тока применяются специальные экраны 3 (рис. 6.11), расположенные в промежутке между катодом 2 и анодом 1, где напряженность электрического поля максимальна. Большая часть фонового тока в этом случае переходит на корпус минуя микроамперметр, которым измеряется разрядный ток.

Для обеспечения зажигания разряда при низких давлениях необходимо повышать анодное напряжение и увеличивать размеры разрядного промежутка.

Для облегчения зажигания разряда в сверхвысоком вакууме на экранных пластинах устанавливают острые иголки, увеличивающие автоэлектронную эмиссию. Наиболее надежным способом обеспечения быстрого зажигания разряда является использование нагреваемых элементов, включение которых приводит к резкому повышению давления или термоэмиссии электронов.

При применении сильных магнитных полей ($B > 0,1$ Тл) значение постоянной n в формуле, описывающей чувствительность прибора, стремится к единице. При этом расширяется диапазон работы прибора в области как низких, так и высоких давлений.

Магнитные преобразователи, так же как и электронные, имеют неодинаковую чувствительность к различным газам. Коэффициенты относительной чувствительности магнитных преобразователей $R_r = K_r/K_v$ для ряда газов представлены в табл. 6.1.

Быстрота откачки колеблется для различных преобразователей в зависимости от рода газа и режимов работы в пределах от 10^{-2} до 1 л/с, что значительно больше, чем для электронных. Это приводит к увеличению погрешности измерений при наличии вакуумного сопротивления между преобразователем и вакуумной камерой.

Преимуществом магнитного преобразователя перед электронным является более высокая надежность в работе в связи с заменой накаливаемого катода холодным, а недостатком — нестабильности, связанные с колебаниями работы выхода электронов при загрязнении катодов.

Эти нестабильности особенно заметны при работе преобразователя в вакуумных системах с парами масла, продукты разложения которого при ионной бомбардировке и масляные диэлектрические пленки, покрывающие поверхности электродов, могут в несколько раз изменить постоянную преобразователя. Во избежание этого необходимо применять самоочищающиеся магнитные преобразователи, работающие на переменном токе. В таких преобразователях катод и анод меняются местами в соответствии с полупериодами питающего напряжения, а очистка их поверхностей осуществляется ионной бомбардировкой.

Отечественной промышленностью выпускается большое количество магнитных вакуумметров, технические характеристики которых даны в табл. П.10.

§ 6.7. Радиоизотопные преобразователи

В радиоизотопных преобразователях для ионизации газа используется α - или β -излучение радиоактивных изотопов: ^{226}Ra , ^{239}Pu , ^{238}Pu , ^3H и т. д. Особенно эффективно использование α -из-

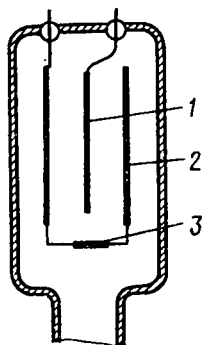


Рис. 6.12. Радионуклидный преобразователь

лучения. Энергия α -частиц (двухзарядных положительных ионов гелия), возникающих при радиоактивном распаде, составляет $(4,5 \dots 5,5) \times 10^6$ эВ. В связи с этим в радионуклидных преобразователях не требуется накаливаемого катода и высокого напряжения, как в электронных и магнитных преобразователях.

Стабильность работы прибора обеспечивается независимостью радиоактивного распада от температуры окружающей среды и физико-химического воздействия находящихся в преобразователе газов. Благодаря этим свойствам и неограниченному сроку службы радионуклидный преобразователь с точки зрения метрологии является одним из лучших приборов для измерения вакуума.

При взаимодействии с молекулами газов α -частицы вызывают их ионизацию, причем количество образованных положительных ионов пропорционально давлению. Измерительное уравнение радионуклидного преобразователя имеет вид $I_n = K_r p$, где K_r — чувствительность преобразователя. Преобразователи обычно градуируются по воздуху или азоту (для воздуха $K_v = 10^{-10} \dots 10^{-11}$ А/Па). Для определения чувствительности к другим газам можно пользоваться представленными в табл. 6.1 значениями $R_r = K_r / K_v$.

Радионуклидный преобразователь (рис. 6.12) состоит из выполненного в виде стержня коллектора 1, цилиндрического анода 2 и радиоизотопного источника 3. Вылетающие из радиоизотопного источника α -частицы, соударяясь с молекулами остаточных газов, образуют положительные ионы, которые под действием разности потенциалов между анодом и коллектором (~ 50 В) направляются к коллектору, вызывая в его цепи ионный ток, пропорциональный давлению.

Нижний предел рабочих давлений определяется фоновым током, возникающим при бомбардировке коллектора α -частицами. Этот ток имеет две составляющие, первая связана с положительным зарядом самих α -частиц, а вторая — с возникновением тока вторичной электронной эмиссии с коллектора. Нижний предел измерения давления радионуклидного манометра составляет $10^{-1} \dots 10^{-2}$ Па. Для расширения диапазона рабочих давлений в некоторых преобразователях коллектор защищен экранами или расположен вне зоны видимости источника α -частиц. При этом нижний предел измеряемых давлений может быть снижен еще на два порядка. Этого же можно достигнуть увеличивая габариты преобразователя, что сопровождается повышением чувствительности без измерения значения фонового тока.

Верхний предел измеряемых давлений обусловлен независи-

мостью от давления газа p ионного тока на коллектор после того, как длина пути, проходимая в газе α -частицей с энергией E_α до полной потери энергии, будет меньше размеров преобразователя:

$$L_z = E_\alpha L_1 / (E_n p); \quad (6.13)$$

здесь E_n — энергия ионизации молекулы газа; L_1 — средняя длина свободного пути α -частицы при единичном давлении. При $E_\alpha = 4,79 \cdot 10^6$ эВ (для радия), $E_n = 15$ эВ, $L_1 = 5 \cdot 10^{-1}$ см/Па и $p = 10^5$ Па получим из (6.13) $L_\alpha = 1,6$ см.

Таким образом, максимальная длина пробега α -частицы в преобразователе с верхним пределом, равным атмосферному давлению, не должна превышать 1,6 см.

Диапазон рабочих давлений радиоизотопных преобразователей составляет $10^5 \dots 10^{-2}$ Па, но обычно его не удается реализовать в одном приборе. Широкодиапазонные конструкции преобразователей выполняются с двумя камерами: большого и малого размеров. Характеристики отечественного радиоизотопного вакуумметра приведены в табл. П.10.

§ 6.8. Градуировка преобразователей для измерения общих давлений

Преобразователи для косвенных измерений давления, показания которых не могут быть рассчитаны с необходимой для практики точностью, градуируются путем сличения их показаний с показаниями образцовых приборов: механических преобразователей и компрессионных манометров. К таким преобразователям относятся тепловые, электронные, магниторазрядные и радиоизотопные.

Приборы для измерения давления, используемые в качестве исходных для градуировки всех других приборов, называются образцовыми средствами измерения первого разряда. Их постоянные или градуировочные кривые рассчитывают по размерам преобразователей и другим значениям, входящим в измерительное уравнение. Приборы, используемые в качестве образцовых, предварительно проградуированные по другим образцовым приборам, называют образцовыми средствами измерения второго разряда. Образцовые средства измерения первого разряда имеют погрешность градуировки не более 1...5%, второго разряда — до 10...15%.

Для расширения диапазона давлений, в котором осуществляется градуировка по образцовым приборам, можно использовать методы изотермического расширения и деления потока.

Метод *изотермического расширения* состоит в том, что камеру малого объема, давление в которой предварительно измеряется образцовым прибором, соединяют с камерой большего объема, начальное давление в которой можно принять равным нулю. По закону Бойля — Мариотта легко подсчитать конечное давление.

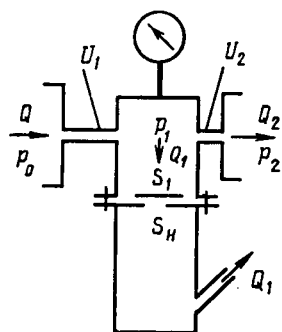


Рис. 6.13. Ячейка вакуумной системы для градуировки манометрических преобразователей методом деления потока

Дальнейшее понижение давления можно получить увеличивая число ступеней расширения. При этом важно учесть ошибки, связанные с натеканием, сорбционными процессами на стенках камер и откачивающим действием градуируемого преобразователя. Эти ошибки определяют нижний предел градуируемого давления. Дополнительная погрешность измерения давления, связанная с точностью измерения объемов, обычно не превышает 0,5%. Этот метод часто используется в диапазоне давлений $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па, когда натеканием и газовой выделением в калиброванном объеме можно пренебречь.

При низких давлениях ($< 10^{-7}$ Па), когда невозможно непосредственное сличение показаний градуированного прибора и компрессионного манометра, можно воспользоваться методом деления потока.

Метод деления потока состоит в том, что в динамической вакуумной системе поток газа, проходящий через последовательно соединенные ячейки (первая из которых показана на рис. 6.13), постепенно уменьшается за счет работы вспомогательных вакуумных насосов. Уравнение потоков для такой ячейки

$$Q = Q_1 + Q_2, \tag{6.14}$$

где $Q = U_1(p_0 - p_1)$ — поток газа, поступающий в ячейку через трубопровод с проводимостью U_1 при разности давлений на его концах p_0 и p_1 ; $Q_1 = S_1 p_1$ — поток газа, откачиваемый вспомогательным насосом, подключенным к ячейке и имеющим эффективную быстроту откачки S_1 ; $Q_2 = U_2(p_1 - p_2)$ — поток газа, удаляемый из ячейки через трубопровод с проводимостью U_2 при разности давлений на его концах p_1 и p_2 .

С учетом выражений для Q , Q_1 и Q_2 уравнение (6.14) можно представить в виде

$$U_1(p_0 - p_1) = S_1 p_1 + U_2(p_1 - p_2),$$

откуда

$$p_1 = \frac{U_1 p_0 + U_2 p_2}{S_1 + U_1 + U_2}. \tag{6.15}$$

Если конструктивно обеспечить, чтобы $S_1 \gg U_1 + U_2$, а $U_1 p_0 \gg U_2 p_2$, то $p_0 \gg p_1 \gg p_2$ и выражение (6.15) можно упростить:

$$p_1 = \frac{U_1}{S_1} p_0.$$

В ряду последовательно соединенных ячеек давление постепенно снижается от ячейки к ячейке и для n -й ячейки может быть определено по формуле $p_n = \frac{U_1 U_2 \dots U_n}{S_1 S_2 \dots S_n} p_0$, причем давление p_0

можно измерить компрессионным манометром.

Недостатком этого метода является то, что для его реализации нужны насосы с очень низким предельным давлением и большой быстротой действия, так как для получения стабильного значения S_i , где $i=1, 2, \dots, n$, насос подключается к камере через диафрагму и соблюдается условие $S_n \gg S_i$.

При градуировке по методу деления потока ошибками, связанными с натеканием и сорбционными процессами, можно пренебречь до тех пор, пока газовый поток в градуировочной камере не будет существенно превышать суммарное натекание и газовыделение. Использование насосов с большой быстротой откачки позволяет осуществить градуировку манометрических преобразователей с погрешностью 4...5% до самых низких давлений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем различие между абсолютными вакуумметрами и вакуумметрами для косвенных измерений?
2. Чем отличается порядок работы с компрессионным манометром по методу линейной и квадратичной шкал?
3. Почему тепловые манометры не используются для измерения высокого вакуума?
4. Каковы причины различия чувствительностей схем электронного преобразователя с внешним и внутренним коллектором?
5. Что является причиной возникновения фоновых токов в электронном преобразователе?
6. Какие существуют пути повышения чувствительности электронных преобразователей?
7. Как уменьшить время зажигания магнитного преобразователя?
8. Чем вызвана зависимость чувствительности от рода газа у электронных и магнитных преобразователей?
9. Почему радиоизотопные преобразователи имеют очень высокий верхний предел измеряемых давлений?
10. Каким образом можно устранить влияние газовыделения вакуумной камеры на точность градуировки манометрических преобразователей?

ГЛАВА 7

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ

§ 7.1. Методы измерения

Измерители парциальных давлений, как и измерители общих давлений, характеризуются нижним и верхним пределами измеряемых парциальных давлений, чувствительностью, а также свойственным только им параметром — разрешающей способностью.

Под разрешающей способностью подразумевается отношение M_e к наименьшему различаемому изменению массового числа ΔM_e : $\rho_M = M_e / \Delta M_e$.

В зависимости от типа прибора во всем диапазоне изменения массовых чисел могут оставаться постоянными значения ρ_M , M_e / ρ_M или $M_{e\rho_M}$. Экспериментально разрешающую способность определяют по масс-спектру. Ширина пика ΔM_e измеряется на уровне 10 или 50% высоты пика.

Измерение парциальных давлений в вакуумных системах в настоящее время проводят двумя методами: ионизационным и сорбционным.

Ионизационный метод основан на ионизации и разделении положительных ионов в зависимости от отношения массы иона к его заряду. Можно одновременно или поочередно измерять составляющие ионного тока, соответствующие парциальным давлениям различных газов, присутствующих в вакуумной системе.

Для разделения ионного тока на составляющие используется различие скоростей движения ионов различных газов, прошедших одинаковую разность потенциалов, т. е. обладающих одинаковой энергией: $mv^2/2 = Uq$, откуда следует выражение для скорости иона

$$v = \sqrt{2Uq/m}. \quad (7:1)$$

Скорость иона определяется отношением m/q . В большинстве случаев при ионизации газов медленными электронами образуются ионы, имеющие один элементарный положительный заряд, вследствие чего (с приемлемой для большинства измерений точностью) можно считать, что скорости ионов в электрическом поле обратно пропорциональны корню из молекулярной массы газа.

Отношение $M_e = M/n_q$ называют массовым числом иона. Здесь M — молекулярная масса, выраженная в атомных единицах массы (а. е. м.); n_q — число элементарных зарядов; 1 а. е. м. равна $1/16$ массы основного изотопа кислорода ^{16}O . Для однозарядных ионов массовое число совпадает с молекулярной массой иона. Например, для однозарядного иона CO_2^+ $M_e = 44$ а. е. м. В результате измерений ионных токов, соответствующих различным массовым числам, получается масс-спектр (рис. 7.1).

Чувствительность ионизационных газоанализаторов определяется как отношение изменения ионного тока в цепи коллектора к вызывающему его изменению парциального давления газа, выражается в А/Па и зависит от рода газа.

Верхний предел измеряемых давлений определяется отклонением от линейной зависимости между ионным током и соответствующим ему парциальным давлением вследствие рассеивания ионов в анализаторе. Предельно допустимое значение такого отклонения — 10%. Максимальные рабочие давления обычно не превышают $10^{-3} \dots 10^{-2}$ Па. При более высоких давлениях для анали-

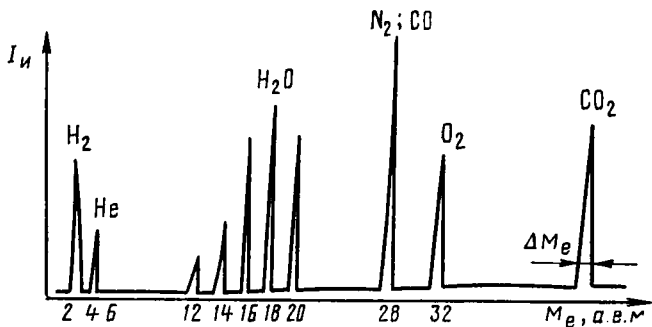


Рис. 7.1. Масс-спектр остаточных газов в вакуумной системе

за газов требуются расширительные устройства или вспомогательная вакуумная система, обеспечивающие снижение плотности анализируемой газовой смеси без изменения процентного состава ее компонентов.

Нижним пределом измеряемых парциальных давлений считается минимальное абсолютное давление, измеряемое прибором. Относительное парциальное давление газов, которое может быть определено при данном отношении сигнал/шум, называют порогом чувствительности. За начало регистрации можно принимать сигнал, вдвое превышающий шум.

В зависимости от характера используемых электрических и магнитных полей ионизационные методы измерения парциальных давлений можно классифицировать на статические и динамические. В статических методах используются постоянные, а в динамических — переменные электромагнитные поля.

К ионизационным статическим газоанализаторам относятся магнитный и панорамный, а к динамическим — омегатронный, времяпролетный, квадрупольный и монополярный фильтры масс. Разрешающая способность промышленных приборов находится в пределах 40 ... 200 а. е. м.

Сорбционный метод измерения парциальных давлений использует анализ адсорбированных газов. В одной из его разновидностей — термодесорбционном методе — из-за различных теплот адсорбции остаточных газов нагревание поверхности по определенному временному закону сопровождается последовательной десорбцией компонентов газовой смеси.

Недостатком метода является невозможность регистрации плохо адсорбируемых газов He, Ne и H₂.

Другой разновидностью сорбционного метода является Оже-спектметрия — метода анализа веществ на поверхности твердого тела по характерным энергиям электронов, эмитируемым при внутриатомном переходе электронов между энергетическими уров-

нями. Исследуемая поверхность облучается потоком ионизирующего излучения, чаще всего первичным потоком электронов с энергией, в 3...5 раз большей потенциала ионизации соответствующего уровня. Глубина выхода Оже-электронов в среднем около 1 нм, т. е. получаемая этим методом информация относится к поверхности исследуемого образца. По составу веществ на поверхности можно определить состав хорошо адсорбирующихся веществ в газовой фазе.

Этот метод нашел широкое применение для контроля элементного состава поверхности, оценки эффективности различных методов очистки подложек, процессов диффузии и миграции, эпитаксии, адсорбции и десорбции.

§ 7.2. Магнитный газоанализатор

Статические магнитные газоанализаторы (масс-спектрометры) (рис. 7.2) основаны на пространственном разделении моноэнергетического пучка ионов в однородном поперечном магнитном поле. Процесс газового анализа состоит из ионообразования, ускорения ионов и формирования ионного пучка, разделения ионов по массовым числам и измерения интенсивности ионного тока.

Ионообразование осуществляется электронной бомбардировкой нейтральных газовых молекул в ионном источнике 4 за счет тока эмиссии i_2 . Ионный источник находится под отрицательным потенциалом относительно земли (~ -1 кВ), выталкивающим ионный пучок i_+ в пространство дрейфа. Положительные ионы, пройдя одинаковое ускоряющее напряжение, входят в пространство дрейфа в соответствии с (7.1) со скоростями $v \sim \sqrt{q/m}$.

В пространстве дрейфа, где действует поперечное магнитное поле индукцией B под воздействием силы Лоренца $F_1 = qvB$, положительные ионы движутся в направлении, определяемом правилом левой руки, по окружностям постоянных радиусов R . При этом центробежная сила Лоренца уравнивается центробежной силой $F_2 = mv^2/R$.

Из условия равенства сил $F_1 = F_2$ найдем выражение для определения радиуса траектории ионов

$$R = mv/(qB), \quad (7.2)$$

которое с учетом (7.1) можно переписать в виде

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{2Um/q}. \quad (7.3)$$

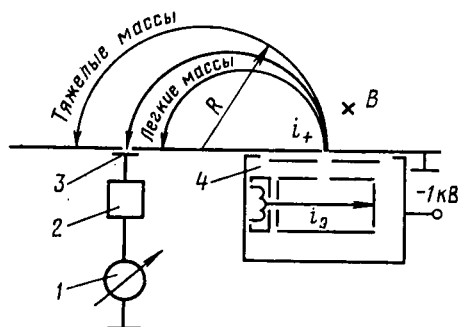


Рис. 7.2. Магнитный статический газоанализатор (масс-спектрометр)

Таким образом, радиус траектории иона прямо пропорционален корню квадратному из отношения массы иона к его заряду. Решая уравнение (7.3) относительно m/q , получим измерительное уравнение статического масс-спектрометра с магнитным отклонением:

$$m/q = R^2 B^2 / (2U). \quad (7.4)$$

В результате взаимодействия с магнитным полем на коллектор 3 попадают только те ионы, радиус траектории которых соответствует положению щели в диафрагме перед коллектором. Изменяя радиус траектории иона R за счет изменения ускоряющего напряжения U или магнитной индукции B , можно создавать условия для попадания на коллектор ионов с различными массовыми числами. Ионный ток коллектора после усилителя 2 измеряется выходным прибором 1.

В рассмотренной схеме анализатора ионы отклоняются на угол 180° . На практике значения углов отклонения могут быть как больше, так и меньше 180° .

Как следует из (7.4), наиболее эффективна магнитная развертка масс-спектра по значению магнитной индукции B , но в связи с лучшим быстродействием, простотой схем питания и меньшими размерами магнитной системы в промышленных приборах предпочтение отдается электростатической развертке по ускоряющему напряжению U .

Разрешающая способность масс-спектрометра зависит от размеров прибора и расширения ионного пучка:

$$\rho_M = \frac{M_e}{\Delta M_e} = \frac{R}{s_1 + s_2 + \sigma(R)},$$

где s_1 и s_2 — ширина щелей на выходе из источника ионов и перед коллектором ионов соответственно; $\sigma(R)$ — суммарное расширение ионного пучка в плоскости щели s_2 в результате аббераций. Абберации являются следствием разброса ионов одинаковой массы по скоростям, неоднородности в распределении магнитного поля по высоте ионного пучка, влияния пространственного заряда и т. д. При диапазоне массовых чисел от 2 до 150 разрешающая способность на половине высоты пика $\rho_M \geq 50$.

Чувствительность масс-спектрометра возрастает при увеличении ширины щелей, которую обычно выбирают от 0,1 до 1 мм. Для стандартных приборов коэффициент чувствительности K_H при откачке азота составляет 10 мА/Па. Относительная чувствительность магнитных анализаторов $C_i = K_{ui}/K_{uN_2}$ зависит от рода газа (табл. 7.1). Верхний предел рабочих давлений 10^{-2} Па определяется постоянством коэффициента чувствительности, нижний 10^{-8} Па — фоновыми токами. Порог чувствительности равен $10^{-3}\%$ и зависит от уровня шумов электрометрического усилителя или множителя и фонового масс-спектра прибора.

Относительная чувствительность C_i приборов
для измерения парциальных давлений различных газов

Приборы	N ₂	H ₂	He	Ar	CO ₂	O ₂	C ₂ H ₂
Магнитные анализаторы	1	0,46	1,17	1,3	1,1	0,83	—
Омегатрон	1	0,45	0,21	1,2	1,37	0,7	1,4

Продолжение табл. 7.1

Приборы	CH ₄	Ne	CO	H ₂ O	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆
Магнитные анализаторы	0,84	0,25	1,08	1,05	0,59	1,16
Омегатрон	0,67	0,3	1,1	0,65	1,04	1,3

Простота и надежность магнитных анализаторов позволяет применять их в системах контроля и управления вакуумными технологическими процессами. Технологические характеристики прибора МСД-1, специально разработанного для управления технологическими процессами от ЭВМ, даны в табл. П.12.

§ 7.3. Панорамный газоанализатор

Панорамный газоанализатор (фарвитрон) относится к статическим приборам для определения парциальных давлений. Разделение ионов по массовым числам осуществляется в нем по частоте колебаний ионов в электростатическом поле с параболическим распределением потенциала. Зависимость частоты колебаний ионов от массового числа в таком поле можно записать в следующем виде:

$$f = K \sqrt{qU/m}, \quad (7.5)$$

где U — напряжение на центральном электроде электростатического поля с параболическим распределением потенциала; K — коэффициент пропорциональности, определяемый геометрией анализатора; m — масса иона; q — заряд иона.

Структурная схема панорамного газоанализатора показана на рис. 7.3. Электронный ток между катодом 1 и сетчатым анодом 3 проходит через диафрагму-модулятор 2. Положительные ионы, образующиеся в результате электронной бомбардировки нейтральных молекул остаточных газов, ускоряются анодом в направлении электростатического поля с параболическим распределением потенциала, образованным электродами 4.

Модулируя электронный ток с частотой колебаний ионов, имеющих заданные массовые числа согласно (7.5), в электростатическом анализаторе можно образовать пакет, число ионов в котором непрерывно увеличивается после каждого периода ионизирующего электронного тока.

Пакет ионов, частота колебаний которого совпадает с частотой напряжения модулирующего электрода,

называется резонансным. Он наводит напряжение на сигнальном электроде 5, которое усиливается высокочастотным усилителем 6 и через демодулятор поступает на вертикально отклоняющую систему катодного осциллографа 7. Горизонтальное отклонение в осциллографе осуществляется генератором развертки 8 на частоте 50 Гц, синхронизирующим горизонтальную развертку осциллографа с временной разверткой высокочастотного напряжения генератора 9, подключенного к модулирующему электроду 2. На экране электронно-лучевой трубки осциллографа можно видеть одновременно весь спектр газов.

Для обеспечения постоянства числа периодов модуляции во время регистрации сигнала, создаваемого ионами любой массы, развертку частоты осуществляют по закону $f = a/t^b$ (a и b — постоянные; t — время).

Подбором показателя степени b можно обеспечить однозначность между выходным сигналом и парциальным давлением различных газов.

Разрешающая способность панорамных анализаторов $\rho_M = 15 \dots 20$, диапазон массовых чисел $2 \dots 200$, диапазон рабочих давлений $10^{-3} \dots 10^{-7}$ Па. Технические характеристики выпускаемого промышленностью панорамного газоанализатора АПДП-2 имеются в табл. П.11.

§ 7.4. Циклотронный газоанализатор (омегатрон)

Циклотронный газоанализатор (омегатрон) относится к динамическим анализаторам парциальных давлений. Принцип его действия основан на движении положительных ионов во взаимно перпендикулярных постоянном магнитном и высокочастотном электрических полях. Ток эмиссии термокатода 5 (рис. 7.4) образует электронный луч по оси прибора z , направленный параллельно

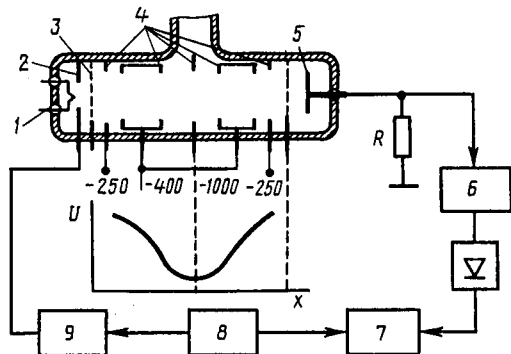


Рис. 7.3. Панорамный газоанализатор (фарвитрон).

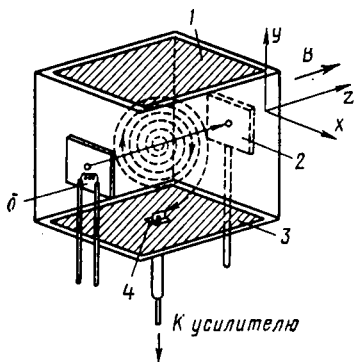


Рис. 7.4. Циклотронный газо-анализатор (омегатрон)

го поля; t — время.

Коллектор 4, расположенный в вырезе нижней пластины, регистрирует только те ионы, для которых период вращения совпадает с периодом изменения электрического поля. Такие ионы называются резонансными. Траектория резонансных ионов представляет собой раскручивающуюся спираль, радиус которой $R = Et/(2B)$.

Резонансные ионы за каждый оборот получают приращение энергии от электрического поля. Остальные ионы движутся по ограниченным траекториям и не достигают коллектора.

Используя выражение (7.2) для радиуса траектории иона, определим период и частоту вращения резонансного иона:

$$T = 2\pi R/v = 2\pi m/(2Bq); \quad f = 1/T = \Omega/(2\pi)$$

($\Omega = Bq/m$ — циклотронная частота).

В постоянном магнитном поле $\Omega m/q = \text{const}$, поэтому шкала массовых чисел при развертке по частоте — гиперболическая.

Измерение ионного тока, проходящего через коллектор, осуществляется электрометрическим усилителем.

Разрешающая способность омегатрона обратно пропорциональна массе иона:

$$p_M = qB^2 R_K / (2E_m),$$

где R_K — расстояние от электронного луча до коллектора.

С увеличением массы иона разрешающая способность уменьшается. Реально удается достигнуть при $\Delta M_e = 1$ а.е.м. значения $p_M = 35 \dots 45$.

Коэффициент чувствительности по азоту при электронном токе 10 мкА лежит в пределах $(4 \dots 10) \cdot 10^{-7}$ А/Па. При больших электронных токах чувствительность уменьшается из-за роста пространственного заряда нерезонансных ионов. Относительная чув-

силовым линиям магнитного поля B к аноду 2. Положительные ионы, образовавшиеся в электронном луче, движутся по спирали в скрещенном постоянном магнитном поле и высокочастотном электрическом поле, приложенном к двум пластинам 1 и 3. Уравнения движения ионов в идеальном омегатроне можно записать в следующем виде:

$$m\ddot{x} = -q\dot{y}B;$$

$$m\ddot{y} = qE \sin \omega t + q\dot{x}B; \quad m\ddot{z} = 0,$$

где E и ω — напряженность и угловая частота высокочастотного электрического

ствительность $C_i = K_{и1}/K_{иN_2}$ зависит от рода газа (см. табл. 7.1).

Максимальное рабочее давление омегатрона $(1 \dots 4) \cdot 10^{-3}$ Па, минимальное — 10^{-8} Па. Технические характеристики промышленных измерителей парциальных давлений омегатронных (ИПДО) приведены в табл. П.12.

§ 7.5. Времяпролетные газоанализаторы

Во времяпролетном динамическом газоанализаторе в одной из конструкций для разделения ионов по массам используют разницу во времени пролета промежутка l_0 ионами различных газов (рис. 7.5, а): $t = l_0/v = l_0 \sqrt{m/(2qU)}$.

Ионообразование осуществляется электронным током, протекающим между термокатодом 6 и анодом 7. На сетку 5 подается отрицательный потенциал U_5 , ускоряющий ионы в пространстве дрейфа между заземленными сетками 4 и 3. Проходя сетку 5, ионы получают одинаковые приращения энергии и в соответствии со своими массовыми числами приобретают различную скорость. В промежутке между заземленными сетками 4 и 3 ионы разделяются на группы с одинаковыми массовыми числами.

Пройдя пространство дрейфа, группы ионов, если сетка 2 заземлена, поочередно достигают приемника ионов 1, которым служит вторичный электронный умножитель. Длительность импульса, образующего масс-спектр, очень мала ($\sim 0,1$ мкс), а частота импульсов может быть до 10 кГц. Умножитель связан с широкополосным усилителем, выходной сигнал которого подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа. По промежутку времени между выталкивающим импульсом и моментом появления пика ионного тока можно определить массовое число.

Для непрерывной регистрации только одного компонента спектра на сетку 2 подается положительный потенциал, чередующийся с отрицательным импульсом U_2 (рис. 7.5, б), во время которого группа ионов с определенным массовым числом достигает приемника 1. Остальные ионы задерживаются положительным потенциалом сетки. Изменяя промежуток времени t_1 , t_2 и т. д. между импульсами на сетках 5 и 2, можно выделять отдельные составляющие масс-спектра.

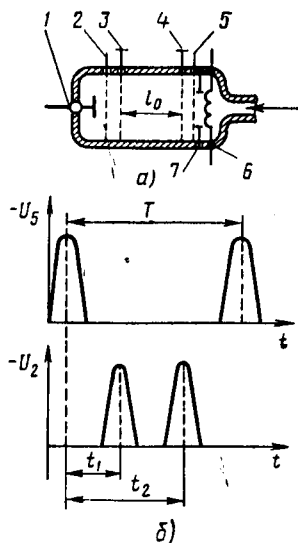


Рис. 7.5. Времяпролетный газоанализатор (хронотрон):

а — схема; б — диаграмма напряжений на основных электродах

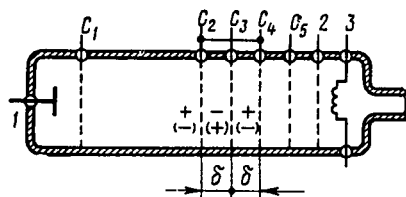


Рис. 7.6. Радиочастотный газоанализатор (топатрон)

Рассмотренный газоанализатор называется хронотроном. Современные хронотроны имеют разрешающую способность (на половине высоты пика) $\rho_M = 100$; диапазон массовых чисел 1... 600 а. е. м.; минимальное измеряемое давление 10^{-8} Па. Недостатком хронотрона является большая длина пространства дрейфа $l_0 \geq 0,5$ м.

Другая конструкция времяпролетного газоанализатора, представленная на рис. 7.6, известна под названием радиочастотного масс-спектрометра или топатрона. Положительные ионы, образовавшиеся в области ионизации (катод 3 и анод 2), ускоряются сеткой C_5 в направлении трехсеточного каскада C_2-C_4 . Между сеткой C_3 и соединенными вместе сетками C_2 и C_4 подается высокочастотное напряжение. Расстояния между сетками C_2, C_3 и C_3, C_4 одинаковы и равны δ .

Между сетками C_4 и C_3 на ионы действует сила высокочастотного электрического поля

$$F_1 = qE \sin(\omega t + \Theta),$$

где E — максимальная напряженность электрического поля между сетками; Θ — начальная фаза высокочастотного поля, соответствующая моменту пересечения ионом плоскости сетки C_4 ($t=0$).

Между сетками C_3 и C_2 действует такая же сила, но с обратным знаком: $F_2 = -qE \sin(\omega t + \Theta)$.

Максимальное приращение энергии получают ионы, пересекающие сетку C_3 в момент перемены знака поля при $\Theta = 0$, для которых выполняется условие $\omega \delta / v + \Theta = \pi$.

Для таких ионов время пролета трехсеточного каскада и периода высокочастотного напряжения совпадают. Такие ионы называются резонансными. Остальные ионы получают меньшее приращение энергии или замедляются. Сетка C_1 имеет отрицательный потенциал, который могут преодолеть на пути к коллектору 1 только резонансные ионы, получившие приращение энергии. Индикация масс-спектра осуществляется осциллографом, подключенным к выходу умножителя. Развертка по массам производится изменением высокочастотного напряжения.

Разрешающая способность времяпролетного газоанализатора

$$\rho_M = M_e / \Delta M_e = t / (2\Delta t),$$

где Δt — длительность прохождения группой ионов с одним массовым числом пространства дрейфа; t — длительность ионизирующего или вытягивающего импульса. Разброс начальных скоростей ионов приводит к необходимости уменьшения Δt .

В этом приборе часто измеряют ионный ток сетки C_5 , пропорциональный общему давлению смеси газов, поэтому прибор удобен для измерения как общих, так и парциальных давлений.

Так как разрешающая способность трехсеточного каскада мала, то последовательно устанавливают несколько каскадов. При четырех каскадах $\rho_M = 45$. Диапазон регистрируемых массовых чисел $2 \dots 200$ а. е. м., минимальное измеряемое давление 10^{-6} Па.

§ 7.6. Электрические фильтры масс

В электрическом фильтре масс разделение ионов по массам осуществляется в высокочастотном электрическом поле квадрупольа, образуемого четырьмя параллельными электродами круглого сечения (рис. 7.7, а). Противоположные электроды соединены попарно, и между ними прикладывается напряжение $\pm(U + V \cos \omega t)$. Уравнения движения ионов в квадрупольном фильтре масс имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{y} - 2q(U + V \cos \omega t) \frac{y}{r_0^2} &= 0; \\ m\ddot{x} + 2q(U + V \cos \omega t) \frac{x}{r_0^2} &= 0; \\ m\ddot{z} &= 0. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Из последнего уравнения системы (7.6) следует, что скорость ионов вдоль оси анализатора z остается неизменной. Первые два дифференциальных уравнения известны под названием уравнений Маттье.

При подстановке новых переменных $\varepsilon = \omega t/2$; $a = 8qU/(mr_0^2\omega^2)$, $g = 4qV/(mr_0^2\omega^2)$ систему уравнений (7.6) можно переписать в другом виде:

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= -(a + 2g \cos 2\varepsilon)x; \\ \ddot{x} &= (a + 2g \cos 2\varepsilon)y; \\ \ddot{z} &= 0. \end{aligned} \quad (7.7)$$

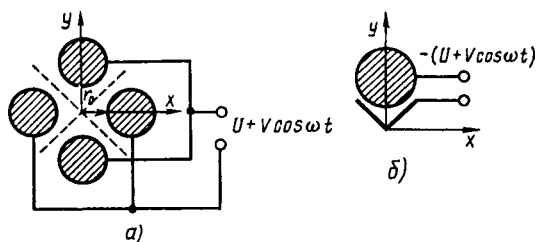


Рис. 7.7. Масс-фильтры:
а — квадрупольный; б — монополярный

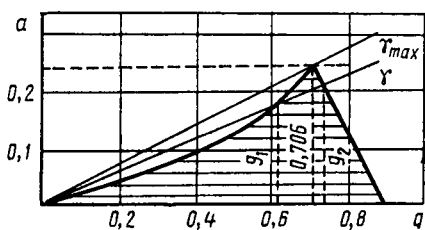


Рис. 7.8. Диаграмма устойчивости

колебаний и нейтрализуются на электродах анализатора.

Разрешающая способность анализатора зависит от отношения напряжений $\gamma = U/V$:

$$\rho_M = \frac{M_e}{\Delta M_e} = \frac{0,75}{1 - \gamma/\gamma_{\max}} (\gamma_{\max} = 0,168). \quad (7.8)$$

При отношении $\gamma \geq \gamma_{\max}$ ионы всех масс независимо от других параметров поля имеют неустойчивые траектории. Из уравнения (7.8) следует, что для получения большей разрешающей способности необходимо в процессе работы всегда выдерживать соотношение $\gamma = 0,999\gamma_{\max}$. Таким образом, напряжение U и V при развертке масс-спектра изменяются совместно, а их соотношение должно поддерживаться с большой точностью.

Массовое число ионов, соответствующих γ_{\max} и имеющих устойчивую траекторию, связано с параметрами поля следующим соотношением:

$$M_e = \frac{1,39 \cdot 10^{-5} V}{f^2 r_0^2},$$

где f — частота, МГц; V — амплитуда высокочастотного напряжения, В; r_0 — радиус поля, м.

Развертка масс-спектра осуществляется изменением амплитуды переменного напряжения на электродах.

Ускоряющее напряжение в источнике ионов, обеспечивающее начальную скорость ионов по оси z , не должно превышать следующего значения:

$$U_y = 4,2 \cdot 10^2 L^2 f^2 M_e \rho_M^{-1}; \quad (7.9)$$

здесь L — длина анализатора, м.

При превышении ускоряющим напряжением данного значения ионы, движущиеся по неустойчивым траекториям, не будут успевать уходить на электроды анализатора. Из (7.9) видно, что разрешающая способность прямо пропорциональна массовому числу.

Разновидностью электрического фильтра масс является моно-

полярный анализатор (рис. 7.7, б), использующий один квадрант квадруполя. Такой анализатор состоит из цилиндрического электрода с отрицательным напряжением и уголкового заземленного электрода, рабочая поверхность которого расположена по нулевым эквипотенциальным линиям квадруполя, показанным пунктиром на рис. 7.7, а. Через монополярный анализатор проходят только ионы, входящие в анализатор во время отрицательной полуволны высокочастотного напряжения. Во время положительной полуволны ионы попадают на уголковогой электрод и нейтрализуются.

Современные квадрупольные и монополярные газоанализаторы (см. табл. П.12) работают в диапазоне массовых чисел от 1 до 500, разрешающая способность на уровне 10% от высоты пика $\rho_m > 500$, коэффициент чувствительности 10^{-2} А/Па, максимальное и минимальное рабочие давления 10^{-2} и 10^{-10} Па соответственно.

§ 7.7. Градуировка ионизационных газоанализаторов

В связи с различной эффективностью ионизации, возможным фракционированием компонентов смеси при напуске, появлением молекулярных осколков, многократной ионизацией, наличием ложных пиков, свойственных отдельным приборам, интенсивности линий в спектре могут не соответствовать парциальным давлениям газов в смеси.

При проведении количественного анализа приборы предварительно калибруют по каждому компоненту смеси. Пробу i -газа вводят в стандартный объем, из которого она поступает в источник ионов. Давление в стандартном объеме измеряют обычным манометрическим преобразователем. Выбирают главную линию спектра этого компонента и по ней определяют чувствительность прибора. После этого находят отношение интенсивностей всех линий спектра данного газа к интенсивности главной линии β_{ji} , где $j = M_e$ — массовое число. Результаты такого исследования для омегатрона даны в табл. 7.2.

Имея спектры чистых газов, можно по интенсивностям масс-спектра смеси определить состав и парциальные давления ее компонентов. Считая, что масс-спектр смеси образуется аддитивным наложением масс-спектров отдельных компонентов, можно составить систему линейных уравнений:

$$I_j = \sum_{i=1}^n I_{ji} = \sum_{i=1}^n K_{ji} p_i; \quad (7.10)$$

здесь I_j — интенсивность линии масс-спектра газовой смеси, соответствующая массовому числу j ; I_{ji} — интенсивность линии масс-спектра i -газа, соответствующая массовому числу j ; p_i — парциальное давление i -компонента смеси; n — число компонентов в смеси; K_{ij} — коэффициент чувствительности по i -газу для j -массового

Таблица 7.2

Относительные интенсивности спектральных линий чистых газов β_{ji}

Газ	Массовое число, а. е. м.																			
	2	3	4	12	13	14	15	16	17	18	20	22	25	26	27	28	29	32	40	44
H ₂	1	0,01																		
He			1																	
CH ₄	0,01			0,20	0,60	0,14	0,8	1												
H ₂ O	0,01							0,02	0,25	1										
Ne										1	0,1									
N ₂						0,08										1	0,01			
CO				0,02		0,01		0,01								1	0,02			
C ₂ H ₄				0,02	0,04	0,06							0,12	0,62	0,65	1	0,02			
C ₂ H ₆					0,01	0,03	0,05						0,04	0,23	0,33	1	0,22			
O ₂								0,1										1		
Ar											0,15								1	
CO ₂				0,03		0,03		0,08				0,02				0,14				1

числа:

$$K_{ji} = \beta_{ji} K_i \quad (7.11)$$

(K_i — коэффициент чувствительности по главной линии спектра; i — порядковый номер компонента смеси).

В расчетах используют относительные коэффициенты чувствительности (см. табл. 7.1) по главным линиям:

$$C_i = K_i / K_0, \quad (7.12)$$

где K_0 — коэффициент чувствительности по главной линии для опорного газа (обычно азот или аргон); величины C_i зависят только от типа газоанализатора, а K_0 определяют индивидуально для каждого прибора.

Подставляя (7.11) и (7.12) в (7.10), получим

$$I_j = K_0 \sum_{i=1}^n \beta_{ji} C_i p_i. \quad (7.13)$$

Система уравнений (7.13) не имеет решения, если $j < i$; имеет одно решение при $j = i$ и несколько при $j > i$. Решением в последнем случае, который обычно встречается на практике, считаются значения парциальных давлений p_i , для которых квадраты невязок уравнений (7.13) имеют минимальное значение.

Для проведения газового анализа ионизационными приборами в диапазоне давлений $10^5 \dots 10^{-1}$ Па используют схему понижения давления (рис. 7.9). Из баллона 1, заполненного исследуемой смесью газов, через капилляр U_1 смесь газов поступает в камеру 2, откуда откачивается насосом 3 через трубопровод U_2 . К камере 2 подключается газоанализатор, в который попадает смесь газов при давлении p_2 , отличным от давления p_1 . Если $p_1 \gg p_2$ и проводимость трубопровода U_2 значительно меньше скорости откачки насоса для всех газов, составляющих анализируемую смесь, то из условия равенства потоков, входящих и выходящих из камеры 2, $U_1 p_1 = U_2 p_2$, откуда $p_2 = p_1 U_1 / U_2$. Это соотношение не учитывает влияния адсорбционных процессов после напуска газа в камеру 2 и откачивающего действия анализатора на измеряемое давление.

Отношение проводимостей U_2 / U_1 , а следовательно, и степень снижения давления p_1 / p_2 могут достигать значений $10^3 \dots 10^6$. При молекулярном режиме течения газа в трубопроводах отношение U_1 / U_2 не зависит от давления и молекулярной массы газа, т. е. парциальное давление каждого компонента смеси в камере 2 пропорционально ее парциальному давлению в камере 1. При этом процентный состав смеси в камере анализатора сохранится таким же, как и в исследуемом объеме.

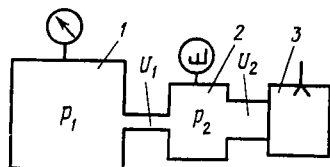


Рис. 7.9. Схема понижения давления

§ 7.8. Термодесорбционный масс-спектрометр

Анализ остаточных газов, присутствующих в вакуумных камерах, основанный на различиях в их теплотах адсорбции, называется термодесорбционной масс-спектрометрией.

Для проведения анализа в камеру с исследуемым газом, имеющую обычный манометрический преобразователь, необходимо поместить прогреваемую прямым пропусканием электрического тока вольфрамовую нить, которая перед началом работы обезгаживается прогревом до 2500 К. После охлаждения на поверхности нити адсорбируются молекулы остаточных газов. Степень покрытия поверхности молекулами остаточных газов, согласно (2.38), при $\theta_0 = 0$ можно рассчитать по формуле

$$\theta_i = \frac{b_i p_i}{1 + b_i p_i} (1 - e^{-A_i t_a}), \quad (7.14)$$

где p_i — парциальное давление i -газа; t_a — время установления адсорбционного равновесия;

$$b_i = \frac{f_i \tau_i}{a_{mi} \sqrt{2\pi m_i k T}}; \quad A_i = \frac{1}{\tau_i} + \frac{f_i p_i}{a_{mi} \sqrt{2\pi m_i k T}};$$

$$\tau_i = \tau_0 e^{Q_{ai}/(RT)} -$$

среднее время нахождения молекулы в адсорбированном состоянии; Q_{ai} — теплота адсорбции i -газа.

Время t_a выбирают достаточным для того, чтобы экспонентой в выражении (7.14) можно было пренебречь.

Минимально необходимое время определяют экспериментально. При увеличении t_a выходной сигнал сначала линейно возрастает, а затем при $t_a > 4,6/A_i$ принимает постоянное значение. В этом случае формулу (7.14) можно упростить: $\theta_i = b_i p_i / (1 + b_i p_i)$.

При нагревании нити происходит десорбция поглощенных газов. При этом в камере, внутри которой находятся нить и манометрический преобразователь, давление повысится на величину

$$\Delta p_i = a_{mi} \theta_i A k T / V, \quad (7.15)$$

где A — поверхность нити; a_{mi} — число молекул, необходимых для образования мономолекулярного слоя i -газа; V — объем камеры.

Повышение давления Δp_i для газов с различной теплотой адсорбции происходит при различных температурах нити, что и используется для определения состава и количества остаточных газов.

Если адсорбирующую поверхность предварительно охладить до температуры жидкого азота, то можно провести анализ газов, имеющих малое значение теплоты адсорбции. На рис. 7.10 представлен пример масс-спектра, полученного термодесорбционным масс-спектрометром. Там же показано изменение температуры

нити T . Существенное отличие этого масс-спектра от получаемых на ионизационных газоанализаторах состоит в том, что пики располагаются не в последовательности возрастания массовых чисел, а в порядке увеличения теплот адсорбции. Этим прибором хорошо разрешаются пики газов N_2 и CO , имеющих одинаковое массовое число.

При расшифровке масс-спектров смеси газов следует учитывать наличие на поверхности адсорбционных центров с различной теплотой десорбции. При этом каждый газ может иметь несколько термосорбционных пиков. Для повышения чувствительности прибора следует увеличивать адсорбирующую поверхность, например путем нанесения активных адсорбентов или травления.

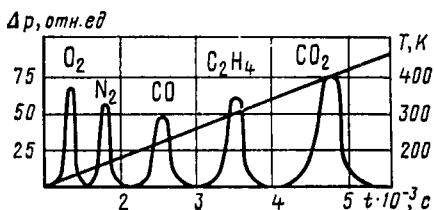


Рис. 7.10. Масс-спектр, получаемый методом термодесорбционной масс-спектрометрии

§ 7.9. Оже-спектрометр

Если на атом воздействует излучение, энергия которого достаточна для ионизации одной из его внутренних электронных оболочек, то образовавшееся при этом вакантное место может быть заполнено электроном с меньшей энергией связи из другой оболочки. Энергия, освобождающаяся при указанном переходе, может превысить энергию связи электрона в одной из внешних оболочек атома, что сопровождается эмиссией электрона. Так, если образовавшаяся в результате внешнего воздействия вакансия на K -уровне заполняется электронами с M -уровнями, а выделяющаяся энергия передается электрону с N -уровня, то этот процесс называют KMN -Оже-переходом. Кинетическая энергия электрона, эмиттированного в результате этого перехода, определяется выражением $E_{KMN} = E_K - E_M - E_N$, где E_K , E_M — энергия связи электронов на K - и M -оболочках атома; E_N — энергия связи на уровне N в атоме с однократно ионизированным уровнем M .

Абсолютное значение энергии эмиттируемых электронов в зависимости от атомного номера элемента и типа перехода может изменяться от 20 до 3000 эВ.

Структурная схема Оже-спектрометра типа «цилиндрическое зеркало» представлена на рис. 7.11. Первичный пучок электронов из блока 1 попадает на мишень 2. Вторичные электроны через щели во внутреннем цилиндре попадают на вход электронного умножителя 7. Энергия электронов, проходящих через щели анализатора, зависит от напряжения U , подаваемого от источника 3 на внешний цилиндр 8. Это напряжение и используется для развертки энергетического спектра электронов, записываемого на

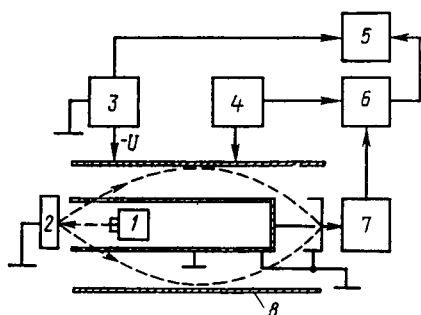


Рис. 7.11. Электростатический анализатор типа «цилиндрическое зеркало»

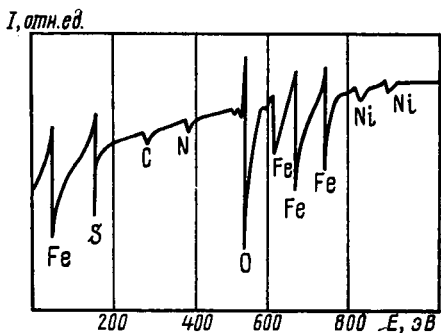


Рис. 7.12. Оже-спектр образца из нержавеющей стали

двухкоординатном самописце 5. Генератор синусоидальных напряжений 4 и усилитель с синхронным детектором 6 позволяют дифференцировать и фильтровать от помех выходной сигнал. На рис. 7.12 показан спектр образца из нержавеющей стали, полученный на таком анализаторе. По оси абсцисс отложена E — энергия эмиттируемых электронов, а по оси ординат — их относительная интенсивность.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит различие между статическими и динамическими газоанализаторами?
2. Какие способы развертки спектра применяются в магнитных масс-спектрометрах?
3. От чего зависит разрешающая способность омегатрона?
4. Чем объяснить большое быстродействие хронотрона?
5. Как происходит разделение ионов по массам в квадрупольном газоанализаторе?
6. Почему ионизационные газоанализаторы не могут работать при давлениях $1 \dots 10^5$ Па?
7. Какое свойство молекул газа используется для их разделения по массам в десорбционной масс-спектрометрии?
8. Чем определяется энергия вторичных электронов, используемых для анализа веществ в Оже-спектрометрии?
9. Как производится расшифровка масс-спектрограмм?
10. Какие методы градуировки измерителей парциальных давлений Вы знаете?

ИЗМЕРЕНИЕ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

§ 8.1. Методы измерения газовых потоков

Газовый поток — это масса газа, проходящая в единицу времени через заданное поперечное сечение элемента вакуумной системы. В Международной системе единицей газового потока является кг/с. Потоки индивидуальных веществ можно измерять также количеством молекул газа, проходящих через заданное сечение элемента вакуумной системы в единицу времени.

При постоянной температуре газа часто используют внесистемную единицу газового потока $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$. Для воздуха при $T_0 = 273 \text{ К}$ $1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$. Стационарный поток газа, выраженный в $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$, можно записать в виде

$$Q = U(p_1 - p_2), \quad (8.1)$$

где U — проводимость вакуумной системы. Уравнение (8.1) может быть использовано для измерения стационарных газовых потоков методом двух манометров по перепаду давления на вакуумном элементе известной проводимости.

Другое выражение для определения как стационарных, так и нестационарных газовых потоков можно записать в дифференциальной форме:

$$Q = \frac{d(pV)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt}. \quad (8.2)$$

В соответствии с уравнением (8.2) для измерения газовых потоков используют два метода: постоянного давления и постоянного объема. При $p = \text{const}$ поток газа $Q = V dp/dt$, а его измерение осуществляется по скорости изменения давления в камере постоянного объема. При $V = \text{const}$ поток газа $Q = V dp/dt$, а его измерение осуществляется по скорости изменения объема газа при постоянном давлении.

Описанные методы считаются абсолютными. Косвенные методы — тепловые, радионуклидные, ионизационные — нуждаются в градуировке по абсолютным методам.

Метод двух манометров. Метод двух манометров основан на измерении перепада давлений на элементе с известной проводимостью в соответствии с уравнением (8.1) и применяется для измерения стационарных или медленно изменяющихся во времени газовых потоков.

На рис. 8.1 показана схема измерения производительности и быстроты действия вакуумных насосов методом двух манометров. Поток газа, откачиваемый насосом 5, измеряется по перепаду давления на диафрагме 3 известной проводимости U . Диафрагма

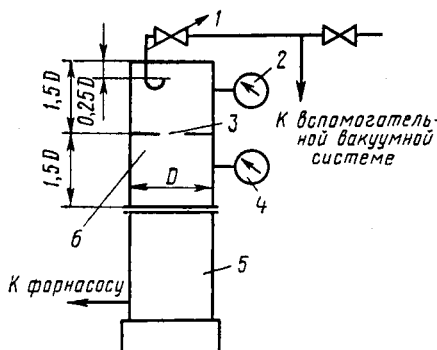


Рис. 8.1. Схема измерения потока газа методом двух манометров

ся по уравнению (8.1), а быстрота откачки

$$S = \frac{Q}{p_2} = \frac{U(p_1 - p_2)}{p_2}. \quad (8.3)$$

Для расширения пределов измерения проводимость диафрагмы можно изменять непрерывно, например с помощью конструкции ирисовой диафрагмы, применяемой в фотоаппаратах, или ступенчато, используя поворотные диски с отверстиями различных диаметров.

Для элементов с малой проводимостью вместо отверстий, изготовление которых сопровождается технологическими трудностями обеспечения формы, используют длинный трубопровод — капилляр.

Метод постоянного давления. Схема измерения газового потока методом постоянного давления, использующая жидкостную бюретку, показана на рис. 8.2, а. Давление в измерительном объеме 5 жидкостной бюретки 6

$$p_{\text{изм}} = p_{\text{в}} - \rho gh, \quad (8.4)$$

где $p_{\text{в}}$ — давление внешней среды; ρ — плотность жидкости в бюретке; h — разность уровней жидкости в измерительном объеме и внешнем цилиндре бюретки. Если выполняется условие, что $p_{\text{в}} \gg \gg \rho gh$, то можно считать, что $p_{\text{изм}} \approx \text{const}$ и требование постоянства давления выполняется. Тогда газовый поток согласно (8.2) определяют по уравнению

$$Q = p_{\text{изм}} \frac{\Delta V}{\Delta t} = K_6 p_{\text{изм}} \frac{\Delta h}{\Delta t}; \quad (8.5)$$

здесь Δh и ΔV — изменения уровня жидкости и величины объема измерительного цилиндра бюретки за время Δt ; K_6 — постоянная бюретки; $K_6 = \pi R_{\text{изм}}^2$; $R_{\text{изм}}$ — радиус измерительного объема.

Кран 4 необходим для опускания жидкости в бюретке и повторения экспериментов. НатекаТЕЛЬ 3 предназначен для регулирова-

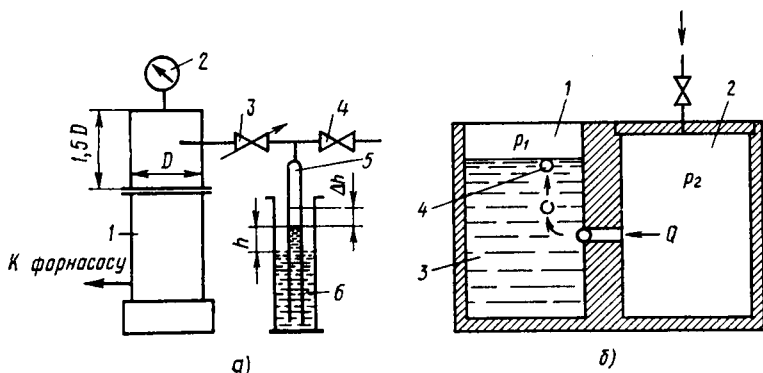


Рис. 8.2. Схема измерения потока газа методом постоянного давления:

а — метод масляной бюретки; б — метод газовых пузырей

ния потока газа. Бюретка обычно заполняется вакуумным маслом, имеющим низкое давление насыщенного пара при комнатной температуре.

Схема измерения газового потока методом постоянного давления, использующая образование газовых пузырей, показана на рис. 8.2, б. При вытекании газа из объема 2 в объем 1 при $p_2 > p_1$ газовый поток может быть рассчитан по скорости dN/dt возникновения и объему V_n газовых пузырей 4, возникающих в жидкости 3:

$$Q = V_n p_1 dN/dt. \quad (8.6)$$

Вакуумирование пространства над жидкостью увеличивает чувствительность измерения, так как сопровождается увеличением объема пузырьков.

Примером использования метода постоянного давления является определение газового потока по известному значению быстроты откачки вакуумной камеры S_0 . Вакуумный насос 1 (рис. 8.2, а) через клапан или диафрагму 2 подключается к откачиваемому объекту 2, давление p в котором измеряется вакуумметром 2. Поток газа регулируется клапаном 4 и натекателем 3.

Быстрота откачки камеры в соответствии с основным уравнением вакуумной техники

$$S_0 = \frac{US_n}{U + S_n}, \quad (8.7)$$

где U — проводимость вакуумной системы от насоса до откачиваемого объекта; S_n — быстрота откачки насоса.

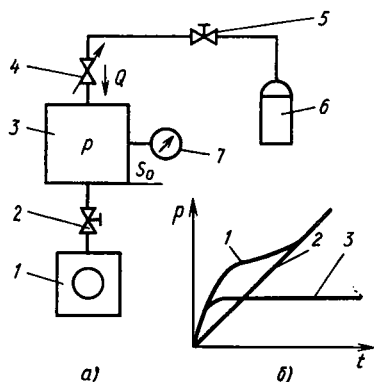


Рис. 8.3. Схема для определения потока газа методом постоянного объема:

a — вакуумная схема; *б* — кривые откачки

получения вакуума в объеме 3. В процессе измерения клапан 2 закрывается. Газ из баллона 6 через натекатель 4, поступающий в объем 3, вызывает увеличение давления p . Если поток газа постоянен, то происходит линейное повышение давления (кривая 2 на рис. 8.3, б). По скорости повышения давления определяют газовый поток:

$$Q = V dp/dt. \quad (8.9)$$

В момент прекращения откачки вакуумной камеры ($t=0$) в ней возникает газовыделение адсорбированных газов, приводящее к нелинейному повышению давления (кривая 3 на рис. 8.3, б). Суммарное изменение давления происходит согласно кривой 1 (рис. 8.3, б). Для надежного измерения потока методом постоянного объема газовыделение должно быть мало по сравнению с измеряемым газовым потоком. Этого можно достичь длительной предварительной откачкой вакуумной камеры.

Метод постоянного объема можно использовать для определения производительности и скорости действия вакуумных насосов. Насос 1 (рис. 8.4) непосредственно подключается к откачиваемому объекту 2. По кривой откачки (рис. 8.5, а) определяется в каждый момент времени t_i значение p_i и по $\operatorname{tg} \varphi$ — значение $\left(\frac{dp}{dt}\right)_i$.

Если выполняется условие $V \gg S_n$, то производительность насоса в каждый момент времени можно рассчитать по формуле (8.9).

Быстрота откачки насоса $S_{nl} = \frac{Q_i}{p_i}$ (рис. 8.5, б).

Измерения удобно проводить в молекулярном режиме, когда проводимость U зависит только от рода газа и температуры, но не зависит от давления. Нестабильностью быстроты откачки насоса можно пренебречь, если $S_n \gg U$; тогда из (8.7) $S_0 \approx U$. Так как $S_0 = dV/dt$, то, согласно (8.2), величина газового потока

$$Q = pS_0. \quad (8.8)$$

Метод постоянного объема. Для определения газового потока методом постоянного объема можно использовать схему на рис. 8.3, а. В этом случае насос 1 и клапан 2 используются в качестве вспомогательной вакуумной системы для получения вакуума в объеме 3.

В процессе измерения клапан 2 закрывается. Газ из баллона 6 через натекатель 4, поступающий в объем 3, вызывает увеличение давления p . Если поток газа постоянен, то происходит линейное повышение давления (кривая 2 на рис. 8.3, б). По скорости повышения давления определяют газовый поток:

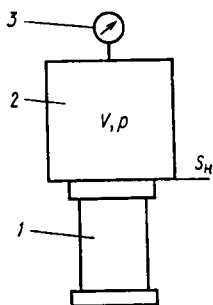


Рис. 8.4. Схема определения производительности вакуумных насосов методом постоянного объема

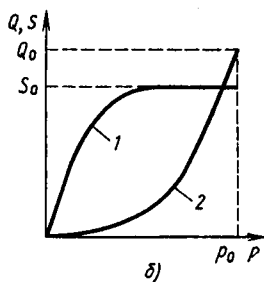
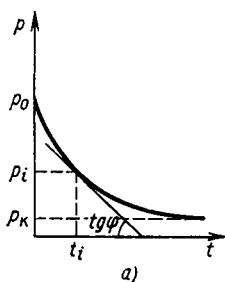


Рис. 8.5. Экспериментальное определение производительности вакуумных насосов: а — кривая откачки; б — зависимости скорости откачки $S(1)$ и производительности вакуумного насоса от давления на входе p $Q(2)$

Косвенные методы определения газовых потоков. Методы измерения газовых потоков, точность которых может быть обеспечена только после предварительной градуировки, называются косвенными. Чувствительность по потоку приборов для косвенных измерений

$$K_Q = a/Q, \quad (8.10)$$

где a — показания прибора в делениях самой чувствительной шкалы; Q — газовый поток, определенный абсолютным методом.

В процессе градуировки определяется диапазон потоков, в котором сохраняется линейность градуировочной характеристики. Проверка градуировки в процессе эксплуатации осуществляется с помощью калиброванных течей, одна из конструкций которых показана на рис. 8.6. Она представляет собой стеклянный баллон 1, заполненный гелием при давлении 10^5 Па. В баллон впаяна через переход 2 кварцевая трубка 3. Гелий диффундирует сквозь плавленный кварц. Для потоков $10^{-6} \dots 10^{-9}$ м³·Па/с проверка течей может производиться один раз в год.

Примером косвенного метода измерения газовых потоков является тепловой метод. Теплопередача в области низкого вакуума при вынужденной конвекции зависит от скорости течения газа, а температура нагретой нити следовательно, от потока газа. В связи с тем что точный расчет зависимости между температурой и газовым потоком выполнить сложно, градуируют тепловой потокомер по абсолютному прибору.

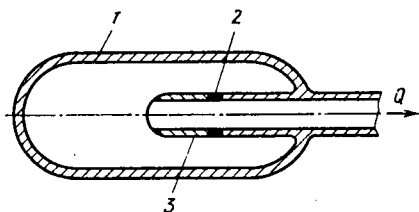


Рис. 8.6. Конструкция калибровочной течи

§ 8.2. Методы течеискания

При изготовлении вакуумных систем из-за пор или трещин в материалах возможно появление течей. Из-за малых размеров дефектов, вызывающих течи, визуально обнаружить их практически невозможно. Для определения места течей разработаны следующие методы течеискания: а) пробного газа; б) высокочастотного разряда; в) люминесцентный; г) радиоизотопный; д) пузырьковый.

Метод *пробного* газа получил наиболее широкое распространение. После получения вакуума в испытуемом объекте место, проверяемое на наличие течи, обдувается пробным газом, который вместо воздуха начинает поступать в этот объект. Изменение состава остаточных газов в вакуумной системе можно зарегистрировать с помощью вакуумметра, показания которого зависят от рода газа, или масс-спектрометра, настроенного на пробный газ.

Для предотвращения повышения давления проверяемый объект должен находиться под непрерывной откачкой. Схема испытания показана на рис. 8.7. Источник пробного газа 1 осуществляет локальный обдув внешней поверхности испытуемого объекта 4.

В вакуумируемом объекте с негерметичной оболочкой разность показаний вакуумметра при изменении давления воздуха и пробного газа

$$\Delta\alpha = \frac{Q_{\text{п}}}{K_{\text{п}}S_{\text{п}}} - \frac{Q_{\text{в}}}{K_{\text{в}}S_{\text{в}}} = \frac{Q_{\text{п}}}{K_{\text{в}}S_{\text{в}}} \left(R \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{п}}} \frac{S_{\text{в}}}{S_{\text{п}}} - 1 \right), \quad (8.11)$$

где $Q_{\text{в}}$ и $Q_{\text{п}}$ — потоки воздуха и пробного газа; $S_{\text{в}}$ и $S_{\text{п}}$ — эффективные быстроты откачки насоса в вакуумируемом объекте по воздуху и пробному газу; $K_{\text{в}}$ и $K_{\text{п}}$ — чувствительность измерителя давления по воздуху и пробному газу; R — относительная чувствительность измерителя давления к пробному газу.

Для получения максимального сигнала необходимо так выбирать пробный газ, чтобы произведение $R(Q_{\text{в}}/Q_{\text{п}})(S_{\text{в}}/S_{\text{п}})$ максимально возможно отличалось от единицы.

Отношение потока пробного газа $Q_{\text{п}}$ к потоку воздуха $Q_{\text{в}}$ можно записать в следующем виде:

$$\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{в}}} = \frac{\Delta p_{\text{п}}}{\Delta p_{\text{в}}} \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{в}}}, \quad (8.12)$$

где $U_{\text{в}}$ и $U_{\text{п}}$ — проводимость течи по воздуху и пробному газу; $\Delta p_{\text{в}}$ и $\Delta p_{\text{п}}$ —

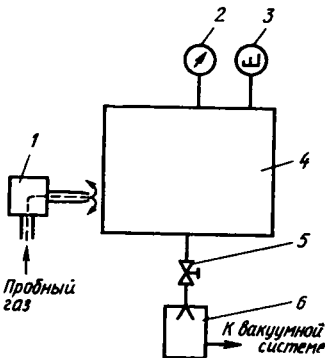


Рис. 8.7. Схема вакуумных испытаний методом пробного газа:

1 — шуп; 2 — манометр; 3 — газоанализатор; 4 — испытуемый объект; 5 — затвор; 6 — насос

перепад давления при испытаниях по воздуху и пробному газу. При молекулярном режиме течения газа отношение (8.12) можно преобразовать к виду

$$\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{в}}} = \frac{\Delta p_{\text{п}}}{\Delta p_{\text{в}}} \sqrt{\frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{в}}} \frac{M_{\text{в}}}{M_{\text{п}}}}, \quad (8.13)$$

где $T_{\text{в}}$ и $T_{\text{п}}$ — температуры воздуха и пробного газа; $M_{\text{в}}$ и $M_{\text{п}}$ — молекулярные массы воздуха и пробного газа.

При использовании ионизационного манометра для определения герметичности вакуумной системы, откачиваемой пароструйным насосом, замещение воздуха на аргон или гелий вызывает 50% увеличения, а в случае диоксида углерода — 50% уменьшения показаний манометра. Основным пробным газом, применяемым при течеиспытании, является гелий. Благодаря химической инертности он безопасен в работе, малая молекулярная масса обеспечивает его хорошее проникновение через течи, а низкая адсорбируемость позволяет уменьшить постоянную времени испытаний.

Электрической компенсацией показаний вакуумметра при измерении давления воздуха до его замещения пробным газом можно повысить чувствительность измерения газового потока. В этом случае фоновый сигнал определяется лишь стабильностью источников питания.

Существенное снижение фонового сигнала можно обеспечить в манометре, отделенном от вакуумной системы селективной мембраной, пропускающей только пробный газ. Например, палладиевая мембрана, нагретая до 700... 800°C, хорошо пропускает водород, оставаясь непроницаемой для всех остальных газов. Чувствительность по потоку в этом случае определяется остаточным давлением газов в объеме манометрического преобразователя.

Для того чтобы соотношение $S_{\text{в}}/S_{\text{п}}$ в формуле (8.11) сильнее отличалось от единицы, нужно использовать насосы, быстрота откачки которых зависит от рода газа. Например, адсорбционный насос, охлаждаемый жидким азотом, значительно хуже откачивает гелий, неон и водород, чем воздух.

При использовании газоанализатора для регистрации пробного газа фоновый сигнал определяется парциальным давлением пробного газа в воздухе и разность показаний:

$$\Delta \alpha = \frac{Q_{\text{п}} - Q_{\text{ф}}}{K_{\text{п}} S_{\text{п}}},$$

где $Q_{\text{ф}}$ — фоновый поток пробного газа. При выборе пробного газа, содержание которого в атмосферном воздухе мало, можно считать $Q_{\text{ф}} \approx 0$. Значение $\Delta \alpha$ при этом много больше, чем в случае применения вакуумметра.

Для индикации появления пробного газа в вакуумной системе используют специальные датчики, чувствительные к выбранному пробному газу. Например, в диоде, анод которого выполнен из платины, нагретой до температуры 800...900°C, при появлении галогенов возникает электрический ток эмиттируемый анодом положительных ионов.

Высокочастотный разряд в среднем вакууме изменяет цвет в зависимости от рода газа. Если в вакуумную систему вмонтирована стеклянная разрядная трубка, то замена воздуха на пары бензина или ацетона меняет цвет разряда в трубке с розового на серый.

Пробные вещества, способные путем захвата электронов из газового разряда образовывать отрицательные ионы, используются в вакуумных электронно-захватных датчиках. К таким веществам относятся хладон и элегаз. Электроны и отрицательные ионы разделяются по различному отклонению в постоянном магнитном поле.

При использовании метода пробного газа необходимо учитывать инерционность испытаний. Время, в течение которого достигается установившийся сигнал, в 5...6 раз больше постоянной времени откачки $\tau = V/S_v$, где V — объем вакуумной системы. Возможности применения этого метода ограничены малыми натеканиями, так как для нормальной работы вакуумметров и газоанализаторов требуется наличие в проверяемом объекте высокого вакуума.

Точность нахождения места течи при обдуве пробным газом невысока. Для уточнения места расположения течи проверяемую поверхность покрывают легкоудаляемой вакуумной замазкой (вакуумпласт, тушь и т. д.), которая в момент прекращения проникновения пробного газа фиксирует место течи. Таким путем течь может быть локализована с точностью до нескольких миллиметров.

Определение негерметичности вакуумных объектов методом пробного газа можно проводить также при повышенном давлении внутри объекта. В этом случае шуп с устройством для всасывания смеси и пробного газа снабжается электронно-захватным, газоаналитическим или галогенным датчиком пробного газа. В электронно-захватных атмосферных датчиках ток газоразрядного диода, работающего в газе-носителе, например аргоне, снижается при появлении пробного газа за счет рекомбинации положительных ионов газа-носителя и отрицательных ионов пробного газа. Газоаналитические датчики используют разность коэффициентов теплопроводности воздуха и пробного газа. Чувствительность испытаний при высоких давлениях обычно ниже, чем при вакуумных испытаниях.

Вместо пробных газов иногда пользуются пробными жидкостями: спиртом, эфиром, бензином, ацетоном и т. д. Большая инер-

ционность испытаний, связанная с временем проникновения жидкости через тонкие капилляры, является существенным недостатком применения пробных жидкостей. При радиусе капилляра 10^{-4} см время проникновения пробной жидкости достигает нескольких часов, возрастая пропорционально уменьшению радиуса капилляра. Применение пробных жидкостей и испытаний при высоких давлениях целесообразно при индикации грубых течей.

Метод *высокочастотного разряда* заключается в том, что при приближении электрода высокочастотного трансформатора к месту течи образуется направленный разряд. Появление разряда связано с понижением давления воздуха в месте течи и улучшением условий электрического пробоя газового промежутка. Этот метод удобен для определения течей в стеклянных вакуумных системах.

Люминесцентный метод использует проникновение раствора люминофора в капиллярные течи. Проверяемый объект длительное время выдерживается в растворе люминофора. После удаления люминофора с поверхности объекта заполненные капилляры легко обнаруживаются в виде точек или полос при облучении ртутно-кварцевыми лампами. Люминофор — люмоген — дает желтое или красное свечение, которое легко отличить от ложных сигналов зеленоватого свечения, возникающего от воздушных пузырьков в стекле, или голубого свечения жировых поверхностных загрязнений.

Радиоизотопный метод обнаружения течей состоит в том, что испытуемые объекты в течение некоторого времени выдерживаются в атмосфере радиоактивного газа. После удаления радиоактивного газа и тщательной очистки поверхности от радиоактивных загрязнений излучающими остаются только негерметичные приборы. Метод применяется для автоматической проверки на герметичность малогабаритных полупроводниковых приборов.

Пузырьковый метод относится к числу наиболее простых. В испытуемом объекте создается избыточное давление газа, а объект погружается в жидкость. Место течи совпадает с местом образования пузырьков. Диаметр пузырька в месте его образования равен диаметру капилляра. Погружение испытуемых объектов в нагретую жидкость сопровождается повышением давления в соответствии с уравнением газового состояния $(p_2 - p_1)/p_1 = (T_2 - T_1)/T_1$, где p_1 , T_1 и p_2 , T_2 — давления и температуры газа до и после нагревания.

Вода может быть нагрета без образования пузырей до 80°C , что соответствует избыточному давлению $2 \cdot 10^4$ Па. При использовании масла температура может быть повышена до 200°C , что позволяет получить избыточное давление $6,8 \cdot 10^4$ Па.

§ 8.3. Требования к герметичности вакуумных систем

Требования к герметичности вакуумных систем формулируются с учетом условий их дальнейшей эксплуатации. В техническом задании на разработку вакуумной системы, работающей под непрерывной откачкой, задается рабочее давление $p_{\text{раб}}$, при котором должен осуществляться технологический процесс. Для обеспечения эффективного использования откачных средств необходимо обеспечить предельное давление

$$p_{\text{пр}} \geq 0,1 p_{\text{раб}}. \quad (8.14)$$

Предположим, что вакуумная система хорошо обезгажена и газовыделением можно пренебречь по сравнению с натеканием, тогда допустимый газовый поток, поступающий через все течи, имеющиеся в вакуумной установке,

$$Q_{\text{н}} \leq p_{\text{пр}} S_0 = 0,1 p_{\text{раб}} S_0, \quad (8.15)$$

где S_0 — быстрота откачки объекта.

Если технические требования связаны с поддержанием не общего, а парциального давления $p_{\text{н}}$ какого-то компонента смеси, содержание которого равно γ , то

$$Q_{\text{н}} \leq 0,1 p_{\text{н}} S_0 / \gamma. \quad (8.16)$$

В вакуумных системах объемом V , работающих в течение времени Δt без непрерывной откачки, для допустимого возрастания давления Δp газовый поток

$$Q_{\text{н}} \leq V \Delta p / \Delta t. \quad (8.17)$$

Если требования ставятся по парциальным давлениям, то аналогично (8.15) получим

$$Q_{\text{н}} \leq V \Delta p_{\text{н}} / (\Delta t \gamma). \quad (8.18)$$

При совпадении условий испытаний на герметичность с рабочими условиями уравнения (8.15)...(8.18) определяют требования к пороговой чувствительности испытаний. Если же контроль герметичности проводится с помощью пробного газа или при другой температуре и перепаде давлений, то требования к пороговой чувствительности необходимо уточнить по уравнению (8.12).

Требования к герметичности сборочных единиц и деталей зависят от требований к герметичности установки в целом. При индивидуальной проверке герметичности элементов в процессе изготовления, считая маловероятным одновременное наличие в собранной установке более двух одинаковых течей, можно принять

$$Q_{\text{нз}} = 0,5 Q_{\text{н}}. \quad (8.19)$$

Рассмотрим примеры определения требований к герметичности.

Пример 1. Рабочий объем непрерывно откачивается с эффективной скоростью $S_0=0,1$ м³/с. По техническим условиям рабочее давление $p_{\text{раб}}$ в установке должно составлять 10^{-4} Па. Каковы требования к пороговой чувствительности течеискателя?

Предельное давление установки, согласно (8.14), $p_{\text{пр}}=0,1$ $p_{\text{раб}}=0,1 \cdot 10^{-4} = 10^{-5}$ Па. Поток, откачиваемый насосом при предельном давлении, $Q=p_{\text{пр}}S_0=10^{-5} \cdot 0,1=10^{-6}$ м³·Па/с. Если считать, что установка хорошо обезгажена и газовыделением можно пренебречь, то натекание в установку не должно превышать $Q_{\text{н}}=10^{-6}$ м³·Па/с.

С учетом того, что сборочные единицы проходят самостоятельную проверку на герметичность, согласно (8.19), допустимое натекание в них $Q_{\text{нэ}}=5 \cdot 10^{-7}$ м³·Па/с.

Проверку на герметичность осуществляют методом вакуумных испытаний с пробным газом. В качестве пробного газа выберем гелий. Тогда, согласно (8.12), при одинаковых перепаде давления и температуре пороговая чувствительность течеискателя не должна быть меньше

$$Q_{\text{He}} = Q_{\text{нэ}} \sqrt{\frac{M_{\text{n}}}{M_{\text{He}}}} = 5 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{29}{4}} \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Пример 2. Вакуумный прибор объемом $V=0,01$ м³, не имеющий непрерывной откачки, должен храниться в течение года $\Delta t=3,5 \cdot 10^7$ с в атмосфере водорода при перепаде давлений $\Delta p=2 \cdot 10^5$ Па. За время хранения допустимое повышение давления из-за негерметичности равно $p=10^{-2}$ Па. Каковы требования к пороговой чувствительности течеискателя?

Поток, который может вызвать указанное повышение давления, согласно (8.17)

$$Q_{\text{н}} = \frac{Vp}{\Delta t} = \frac{0,01 \cdot 10^{-2}}{3,5 \cdot 10^7} = 2,9 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Если проводить вакуумные испытания с гелием в качестве пробного газа, то методика испытаний должна обеспечивать пороговую чувствительность согласно (8.12):

$$Q_{\text{He}} = \frac{Q_{\text{н}} \Delta p_{\text{He}}}{\Delta p_{\text{H}_2}} \sqrt{\frac{M_{\text{H}_2}}{M_{\text{He}}}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-12} \cdot 10^5}{2 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{2}{4}} = 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

§ 8.4. Аппаратура для определения герметичности

В настоящее время широко применяется масс-спектрометрический течеискатель, обладающий самой высокой чувствительностью. Минимальные течи, которые можно обнаружить этим прибором, равны 10^{-13} м³·Па/с. На рис. 8.8 показана масс-спектрометрическая камера течеискателя, предназначенного для работы с гелием в качестве пробного газа. Электроны, эмиттируемые катодом 9, попадают в камеру ионизации 8. Источник питания катода 11 подключен к анализатору через фланец 10. В случае негерметичности вакуумной системы, обдуваемой пробным газом, молекулы гелия через фланец 5 проникают в камеру ионизации. Положительные ионы гелия ускоряющим напряжением направляются в камеру магнитного анализатора 6. Ускоряющее напряжение E_y и магнитная индукция B подбираются таким образом,

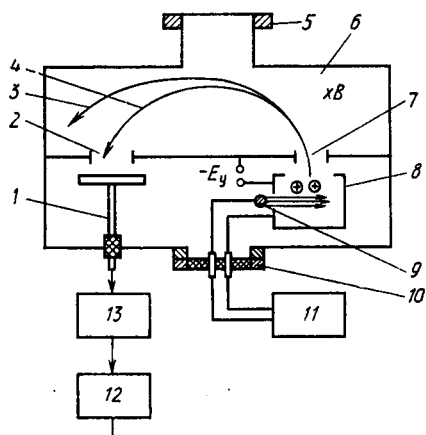


Рис. 8.8. Масс-спектрометрическая камера течеискателя

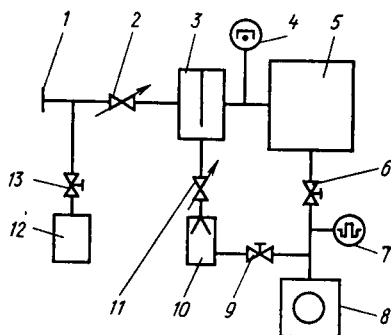


Рис. 8.9. Вакуумная схема масс-спектрометрического течеискателя

чтобы ионы гелия, прошедшие через входную щель 7, двигаясь по траектории 4, попали в выходную щель 2. Остаточные газы по траектории 3 разряжаются на стенках анализатора. В отличие от анализаторов парциальных давлений, которые должны иметь высокую разрешающую способность и перестраиваться на различные массовые числа, датчик течеискателя настраивается только на пробный газ. При этом входная и выходная щели могут быть расширены, что увеличивает чувствительность течеискателя. Этот способ повышения чувствительности можно применять для гелия, не имеющего в составе воздуха веществ с близкими массовыми числами.

Коллектор ионов 1 соединяется с электрометрическим каскадом 13, усиливающим падение напряжения на высокоомном сопротивлении. Блок измерения ионного тока 12 после дополнительного усиления выходного сигнала электрометрического каскада выводит результаты измерений на стрелочный прибор или самописец.

Течеискатель подключается к испытуемому объекту с помощью фланца 1 (рис. 8.9). Для предварительной градуировки может применяться гелиевая течь 12, подключенная через клапан 13. Для дросселирования больших потоков, поступающих в течеискатель, служит клапан-натекатель 2. Ловушка 3 с насосом 10, подключенным через клапан 11, используется для создания рабочего давления 10^{-2} Па, измеряемого преобразователем 4 и необходимого для работы масс-спектрометрической камеры 5. Форвакуумный насос 8 обеспечивает через клапан 9 работу высоковакуумного пароструйного насоса 10 и через клапан 6 — байпас-

ную откачку камеры 5. Работоспособность насоса 8 можно определить при помощи манометра 7.

Течейскатель может подключаться к вакуумным системам как со стороны высокого, так и со стороны низкого вакуума. Вакуумная система течейскаателя предназначена для откачки масс-спектрометрической камеры и, как правило, не может быть использована для откачки испытуемого объекта, который должен иметь собственную откачку систему.

Атмосферный датчик галогенного течейскаателя представляет собой диод прямого накала (рис. 8.10, а), у которого эмиттирующим электродом служит платиновая спираль 1, нагретая до $800 \dots 900^\circ\text{C}$, а коллектором возникающих в присутствии галогенов положительных ионов — цилиндрический электрод 2, охватывающий нить накала. Ионный ток измеряется усилителем 3. Воздух вместе с галогенами, выходящими из камеры, засасывается в датчик вентилятором 4.

Вакуумный датчик (рис. 8.10, б) подключается к вакуумной системе с помощью фланца 1 и содержит; так же как и атмосферный, платиновую спираль 3 и коллектор ионов 2, соединяемых через электрические выводы в вакуум в корпусе 4 с измерительным блоком 6, индицирующим течь стрелочным прибором или звуковым сигналом, и с источником питания 5.

Технические характеристики течейскаателей, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. П.11.

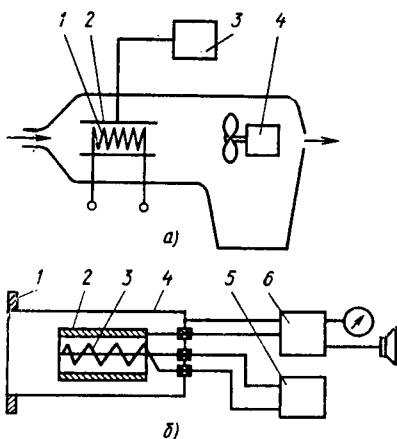


Рис. 8.10. Датчики галогенного течейскаателя:

а — атмосферный; б — вакуумный

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие Вы знаете абсолютные методы измерения газовых потоков?
2. Какие Вы знаете косвенные методы измерения газовых потоков?
3. Какие единицы используются для измерения газовых потоков?
4. Как измерить производительность вакуумного насоса?
5. Какие существуют методы течейскания?
6. Каковы преимущества и недостатки использования в течейскании пробных жидкостей и газов?

7. Определить требования к пороговой чувствительности течейскаателя для проверки герметичности объекта объемом 1 л, если допустимое повышение давления 10^{-4} Па при хранении его в нормальных условиях в течение суток.

8. Определить требования к пороговой чувствительности течейскаателя для проверки герметичности объекта, снабженного насосом с быстротой откачки 10 л/с, если в откачиваемом объекте должно поддерживаться давление 10^{-3} Па.

9. Как можно повысить чувствительность масс-спектрометра при работе в режиме теческателя?

10. В чем преимущества и недостатки атмосферных и вакуумных датчиков галогенных теческателей?

ГЛАВА 9

СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

§ 9.1. Распределение давления в вакуумной системе

Для стационарного режима характерно постоянство во времени потоков и давлений во всех сечениях вакуумной системы. Газовый поток не остается постоянным по длине вакуумной системы, а увеличивается от одного элемента к другому за счет натекания и газовыделения.

Для расчета распределения давления по длине вакуумной системы запишем дифференциальное уравнение баланса сил в трубопроводе:

$$Q = C \frac{dp}{dx}, \quad (9.1)$$

где C — коэффициент пропорциональности.

Будем считать, что трубопровод по всей длине имеет постоянную форму поперечного сечения с периметром Π , а газовыделение с единицы поверхности равно q . Тогда дифференциальное уравнение баланса массы можно записать в виде

$$\frac{dQ(x)}{dx} = -q\Pi \quad (9.2)$$

при граничных условиях $Q = Q_0$, $x = l$ (рис. 9.1).

Газовый поток в различных сечениях трубопровода может быть найден в результате интегрирования (9.2):

$$Q = q(l - x)\Pi + Q_0. \quad (9.3)$$

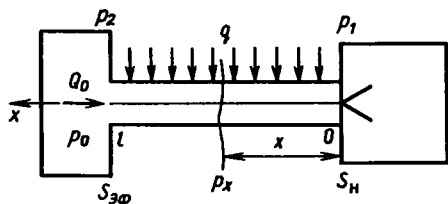


Рис. 9.1. Простейшая вакуумная система

Исключая Q из уравнений (9.1) и (9.3), получим дифференциальное уравнение стационарной откачки:

$$C \frac{dp}{dx} = q(l - x)\Pi + Q_0. \quad (9.4)$$

Рассмотрим молекулярный режим течения газа, когда C — постоянная. Разделяя переменные и интегрируя уравнение (9.4) в пределах от p_1 до p_x и от 0 до x , получим

$$C [p_x - p_1] = q\Pi \left(xl - \frac{x^2}{2} \right) + Q_0 x, \quad (9.5)$$

откуда следует выражение для распределения давления по координате x

$$p_x = p_1 + \frac{q\Pi}{C} \left(lx - \frac{x^2}{2} \right) + \frac{x}{C} Q_0. \quad (9.6)$$

Примеры такого распределения даны на рис. 9.2 (кривые 1 и 2).

Давление p_2 при $x=l$ можно записать как

$$p_2 = p_1 + \frac{l}{C} \left(Q_0 + \frac{q\Pi l}{2} \right). \quad (9.7)$$

Если $Q_0 \gg q\Pi l/2$, то влиянием собственного газовыделения трубопровода на распределение давления можно пренебречь. Обозначая $C/l = U$, с учетом сделанного допущения (9.7) можно преобразовать к виду

$$Q = U(p_2 - p_1), \quad (9.8)$$

аналогичному (3.38). Распределение давления в этом случае становится линейным, а газовый поток постоянен во всех сечениях вакуумной системы:

$$Q = p_x S_x = p_1 S_n = p_0 S_{эф}. \quad (9.9)$$

Из (9.8) и (9.9) следует основное уравнение вакуумной техники (4.7)

$$S_{эф} = \frac{S_n U}{S_n + U}.$$

Вводя в основное уравнение коэффициент использования насоса $K_n = S_{эф}/S_n$, получим полезные соотношения (4.8) и (4.9):

$$K_n = \frac{U}{S_n + U};$$

$$U = S_n \frac{K_n}{1 - K_n}.$$

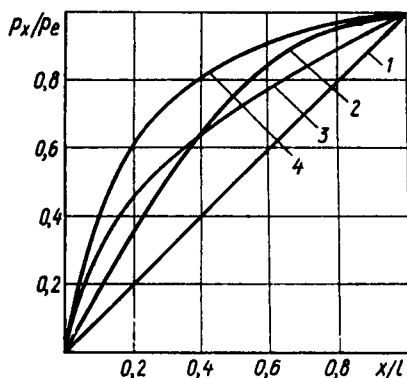


Рис. 9.2. Распределение давления по длине трубопровода: при молекулярном режиме: 1 — $q=0$; $Q_0 \neq 0$; 2 — $Q_0=0$; $q=0$; при вязкостном режиме: 3 — $q=0$; $Q_0 \neq 0$; 4 — $Q_0=0$; $q \neq 0$

Рассмотрим вязкостный режим течения газа по трубопроводу, когда проводимость трубопровода прямо пропорциональна давлению газа, т. е. $C = Ul = C_0 p$.

Используя такие же преобразования, как и при выводе уравнения (9.6), найдем давление в произвольном сечении:

$$p^2(x) = p_1^2 + \frac{2q\Gamma}{C_0} \left(lx - \frac{x^2}{2} \right) + \frac{2x}{C_0} Q_0. \quad (9.10)$$

Примеры распределения давления по длине трубопровода при вязкостном режиме течения даны на рис. 9.2 (кривые 3 и 4). При $x=l$ давление на конце трубопровода, соединенного с откачиваемым объектом,

$$p_2^2 = p_1^2 + \frac{2l}{C_0} \left(Q_0 + \frac{q\Gamma l}{2} \right). \quad (9.11)$$

Зависимость давления от длины трубопровода при вязкостном режиме течения в случае $Q_0 \gg \frac{q\Gamma l}{2}$ параболическая. Обозначая

$U = C_0(p_1 + p_2)/(2l)$, вновь получим уравнение (9.8).

Давление p_0 можно найти из условия $Q_0 = U_0(p_0 - p_2)$, где U_0 — проводимость входного отверстия при соответствующем режиме течения.

Давление p_1 определяется характеристиками насоса. Если принять теоретическую зависимость быстроты откачки насоса S_n от давления в виде функции

$$S_n = S_m(1 - p_{np}/p_1), \quad (9.12)$$

где S_m — номинальная быстрота действия насоса; p_{np} — предельное давление насоса, то рабочее давление насоса

$$p_1 = \frac{Q}{S_n} = \frac{Q}{S_m(1 - p_{np}/p_1)}. \quad (9.13)$$

Решая это уравнение относительно p_1 , получим

$$p_1 = p_{np} + Q/S_m. \quad (9.14)$$

§ 9.2. Соединения арматуры и откачиваемых объектов

Арматура (коммутационные элементы, ловушки, трубопроводы) и откачиваемые объекты, соединяясь друг с другом, образуют сложные вакуумные системы. Место соединения двух элементов и более называют узлом вакуумной системы.

В узле сумма газовых потоков, проходящих через все K соединенные каналы, равна нулю, т. е.

$$\sum_{i=1}^K Q_i = 0. \quad (9.15)$$

Если в узле находится вакуумный насос, то (9.15) можно переписать в виде

$$\sum_{i=1}^{K-1} Q_i = S_n p_n, \quad (9.16)$$

где S_n и p_n — быстрота действия и давление насоса.

При наличии в вакуумной системе нескольких узлов для каждого из них можно записать уравнение вида (9.15). Решая систему алгебраических уравнений, можно определить давления во всех узлах вакуумной системы.

Параллельное соединение трубопроводов (рис. 9.3) позволяет увеличить поток газа между двумя соседними узлами вакуумной системы. Давления p_1 и p_2 на концах всех трубопроводов одинаковы, а суммарный поток, который протекает между узлами, с учетом (9.8)

$$Q = \sum_{i=1}^K Q_i = (p_1 - p_2) \sum_{i=1}^K U_i$$

где Q_i — поток, протекающий через i -й трубопровод.

Расчетную схему вакуумной системы можно упростить, считая, что узлы связаны одним эквивалентным трубопроводом проводимостью U :

$$U = \sum_{i=1}^K U_i. \quad (9.17)$$

При обобщенном молекулярно-вязкостном режиме течения газа при постоянной температуре и молекулярной массе проводимость трубопровода является функцией давления и геометрических размеров трубопровода:

$$U_i = \frac{A_i d_i^3}{l_i} + \frac{B d_i^4}{l_i} p_{cp}, \quad (9.18)$$

где A , B — постоянные; d и l — диаметр и длина трубопровода; p_{cp} — среднее давление в трубопроводе: $p_{cp} = (p_1 + p_2)/2$.

Перепишем (9.17) с учетом (9.18):

$$\frac{A d^3}{l} + \frac{B d^4}{l} p_{cp} = A \sum_{i=1}^K \frac{d_i^3}{l_i} + B p_{cp} \sum_{i=1}^K \frac{d_i^4}{l_i}. \quad (9.19)$$

Записывая равенство коэффициентов в левой и правой частях

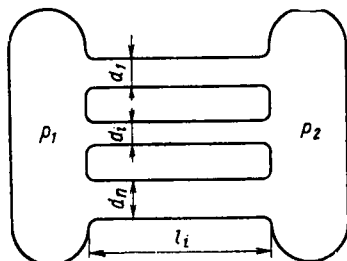
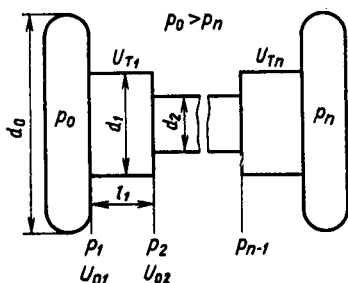


Рис. 9.3. Параллельное соединение трубопроводов



Р и с. 9.4. Последовательное соединение трубопроводов

(9.19) при одинаковых степенях p_{cp} , получим два уравнения

$$\frac{d^3}{l} = \sum_{i=1}^K \frac{d_i^3}{l_i}; \quad \frac{d^4}{l} = \sum_{i=1}^K \frac{d_i^4}{l_i},$$

из которых можно найти диаметр d и длину l эквивалентного трубопровода.

Последовательное соединение элементов (отверстий и трубопроводов) показано на рис. 9.4. При одинаковом потоке газа во всех элементах можно записать

$$Q/U_i = p_{i-1} - p_i. \quad (9.20)$$

Складывая все n уравнений системы (9.20), получим

$$Q \left(\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \dots + \frac{1}{U_i} + \dots + \frac{1}{U_n} \right) = p_0 - p_n.$$

Для всей системы последовательно соединенных элементов можно также записать

$$Q/U = p_0 - p_n. \quad (9.21)$$

Сравнивая (9.20) и (9.21), получим, что общую проводимость последовательно соединенных элементов можно рассчитать по формуле

$$U = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (1/U_i)}. \quad (9.22)$$

Для расчета сложных вакуумных систем методами механики сплошной среды сделаем следующие допущения; 1) при последовательном соединении элементов с различными диаметрами условных проходов в местах сужения проходного сечения возникают дополнительные сопротивления потоку газа; 2) места расширения проходного сечения в вакуумных системах дополнительного сопротивления потоку газа не оказывают.

При молекулярном режиме течения система последовательно соединенных отверстий и длинных трубопроводов может быть заменена эквивалентным отверстием, подключенным к бесконечно большому объекту. Для системы, показанной на рис. 9.4, с учетом того, что проводимость круглого отверстия

$$U_{0i} = C d_i^2 / (1 - d_{i-1}^2/d_i^2),$$

где C — постоянная, d_i — диаметр отверстия, d_{i-1} — диаметр пре-

дыдущего элемента, а проводимость длинного трубопровода $U_{\text{тр}} = Ad_l^3/l_l$, согласно (9.22), получим

$$\frac{1}{Cd^2} = \frac{1 - d_0^2/d_1^2}{Cd_1^2} + \dots + \frac{1 - d_{i-1}^2/d_i^2}{Cd_i^2} + \dots + \frac{1 - d_{m-1}^2/d_m^2}{Cd_m^2} + \frac{l_1}{Ad_1^3} + \dots + \frac{l_j}{Ad_j^3} + \dots + \frac{l_n}{Ad_n^3};$$

здесь m — число сужений трубопровода; n — число трубопроводов в системе. Решая записанное уравнение, можно найти диаметр d отверстия, проводимость которого равна проводимости сложной системы последовательно соединенных элементов.

При вязкостном режиме течения также можно определить размеры эквивалентного трубопровода. Если пренебречь сопротивлением отверстий, то систему уравнений (9.20) можно переписать с учетом общей формулы проводимости трубопровода при постоянной температуре $U_i = Bd_i^4(p_{i-1} + p_i)/(2l_i)$ в следующем виде:

$$Q \frac{2l_i}{Bd_i^4} = p_{i-1}^2 - p_i^2.$$

Сложив все уравнения, получим

$$\frac{2Q}{B} \left(\frac{l_1}{d_1^4} + \dots + \frac{l_l}{d_l^4} + \dots + \frac{l_n}{d_n^4} \right) = p_1^2 - p_n^2,$$

откуда следует, что диаметр d и длина l эквивалентного трубопровода должны удовлетворять условию

$$\frac{l}{d^4} = \frac{l_1}{d_1^4} + \dots + \frac{l_l}{d_l^4} + \dots + \frac{l_n}{d_n^4}. \quad (9.23)$$

Задаваясь длиной эквивалентного трубопровода l , из (9.23) можно определить его диаметр d .

Параллельное соединение откачиваемых объектов к одному насосу (рис. 9.5, а) часто применяется при откачке небольших приборов. Записав уравнение (9.15) для узла с давлением p_0 , найдем

$$p_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i (\bar{S}_n + U_0)}{S_n U_0}. \quad (9.24)$$

Давление в любом откачиваемом объекте p_i зависит от p_0 . Согласно (9.8), получим

$$p_i = Q_i/U_i + p_0. \quad (9.25)$$

Для последовательного соединения откачиваемых объектов (рис. 9.5, б) давление p_0 определяют по формуле (9.24), а давле-

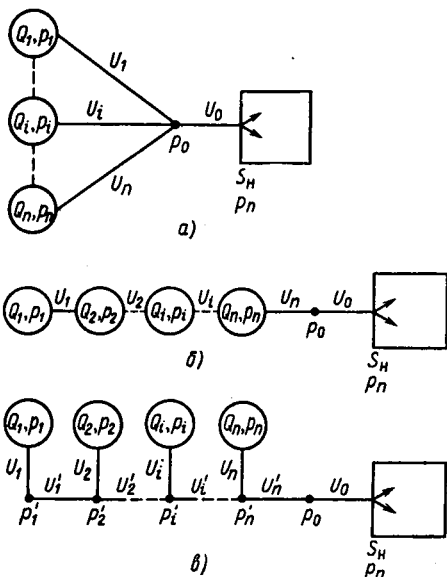


Рис. 9.5. Соединения откачиваемых объектов:

а — параллельное; б — последовательное; в — параллельно-последовательное

Аналогично можно определить давление в любом откачиваемом объекте:

$$p_i = p'_i + \frac{Q_i}{U'_i} = p'_{i+1} + \frac{\sum_{j=1}^i Q_j}{U'_i} + \frac{Q_i}{U'_i} \quad (9.27)$$

§ 9.3. Соединения насосов

В вакуумных системах с большими газовыми потоками используют параллельное соединение насосов (рис. 9.6, а). Запишем уравнение (9.15) для узла А, к которому подключены через элементы с проводимостями $U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n$ все входные патрубки параллельно соединенных насосов:

$$Q = \sum_{i=1}^n U_i (p_A - p_i) = \sum_{i=1}^n S_{нi} p_i \quad (9.28)$$

где Q — суммарный поток, откачиваемый системой насосов.

Для входных сечений насосов уравнение (9.16) можно записать в виде равенства потоков, проходящих через элемент прово-

дне p_i в любом откачиваемом объекте, согласно (9.8),

$$p_i = p_{i+1} + \frac{\sum_{j=1}^i Q_j}{U_i} \quad (9.26)$$

Параллельно - последовательное соединение откачиваемых объектов (рис. 9.5, в) отличается от параллельного соединения (рис. 9.5, а) наличием коллектора, проводимость которого соизмерима с проводимостями трубопроводов, выходящих непосредственно из откачиваемых объектов. Давление p_0 определяют по формуле (9.24). Записывая уравнения (9.15) для узла, давление в котором p'_n , найдем

$$p_n = p_0 + \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{U_n} + \frac{Q_n}{U_n}$$

димостью U_i и через насос с быстротой откачки S_i :

$$U_i(p_A - p_i) = S_{ni} p_i. \quad (9.29)$$

Решая (9.29) относительно p_i , найдем

$$p_i = p_A \frac{U_i}{S_{ni} + U_i}. \quad (9.30)$$

Быстроту откачки в узле A определяем после подстановки (9.30) в (9.28):

$$\begin{aligned} S_A &= \frac{Q}{p_A} = \sum_{i=1}^n \frac{S_{ni} U_i}{S_{ni} + U_i} = \\ &= \sum_{i=1}^n S_{Ai}. \end{aligned} \quad (9.31)$$

Из (9.31) следует, что быстрота откачки в узле A равна сумме эффективных быстрот откачки всех насосов. Таким образом, систему параллельно соединенных насосов можно заменить одним насосом, подключенным к узлу и имеющим быстроту действия, определяемую по формуле (9.31).

Если все насосы одинаковы, то $S_A = nS_{Ai}$, а для обеспечения в узле A давления p_A требуется следующее число насосов:

$$n = Q / (p_A S_{Ai}). \quad (9.32)$$

Определим предельное давление системы в узле A при $Q=0$, если система составлена из насосов с различными предельными давлениями $p_{пр i}$.

В этом случае уравнение потоков (9.15) для узла A запишем в виде

$$\sum_{i=1}^n S_{ni} p_i = 0. \quad (9.33)$$

Используя зависимость S_{ni} от давления согласно (9.12), можно (9.33) преобразовать к виду

$$\sum_{i=1}^n S_{mi} (p_i - p_{пр i}) = 0. \quad (9.34)$$

Для каждого из насосов справедливо уравнение

$$U_i (p_A - p_i) = S_{mi} (p_i - p_{пр i}), \quad (9.35)$$

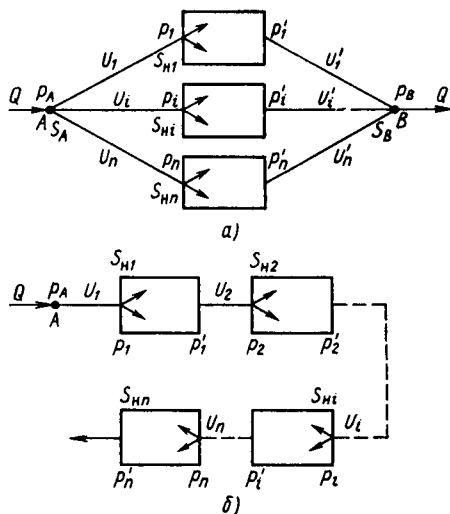


Рис. 9.6. Соединения насосов: а — параллельное, б — последовательное

из которого находим

$$p_i = \frac{U_i p_A + S_{mi} p_{нрi}}{S_{mi} + U_i}. \quad (9.36)$$

После подстановки (9.36) в (9.34) и решения полученного выражения относительно давления p_A получим выражение для предельного давления системы параллельно включенных насосов:

$$p_A = \frac{\sum_{i=1}^n p_{нрi} S_{m\text{эф}i}}{\sum_{i=1}^n S_{m\text{эф}i}}, \quad (9.37)$$

где

$$S_{m\text{эф}i} = \frac{S_{mi} U_i}{S_{mi} + U_i}.$$

Максимальный газовый поток, который может быть откачан системой параллельно включенных насосов, соответствует равенству давлений p_i' в их выходных патрубках максимальным выпускным давлениям насосов p_{mi} , которые зависят от конструкции насоса и указываются в каталогах. Уравнение потоков (9.15) в узле B запишем, полагая, что $p_i' = p_{mi}$:

$$\sum_{i=1}^n (p_{mi} - p_B) U_i' = Q. \quad (9.38)$$

Решая уравнение (9.38) относительно давления в узле B , получим

$$p_B = \frac{\sum_{i=1}^n U_i' p_{mi} - Q}{\sum_{i=1}^n U_i'}. \quad (9.39)$$

Эффективная быстрота откачки насоса предварительного разрежения в узле B

$$S_B = \frac{Q}{p_B} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i'}{\sum_{i=1}^n (U_i' p_{mi}/Q) - 1}. \quad (9.40)$$

Величина быстроты откачки по формуле (9.40) определена с запасом, так как маловероятно, чтобы в системе с разными насосами все давления на их выходе стали одновременно равными максимальным выпускным. Уточнить S_B можно для конкретной системы насосов при условии $p_i' \leq p_{mi}$.

Система последовательно соединенных насосов (рис. 9.6, б) очень часто используется в высоковакуумных установках. Если пренебречь собственным газовыделением насосов и соединительных трубопроводов, то в стационарном режиме работы газовый поток Q во всех насосах останется неизменным и можно записать условие постоянства потока в виде

$$S_{ni}p_i = S_{n(i+1)}p_{i+1} = Q. \quad (9.41)$$

Из условия (9.41) следует, что требуемые быстроты действия последовательно соединенных насосов уменьшаются пропорционально возрастанию давления:

$$S_{n(i+1)}/S_{ni} = p_i/p_{i+1}. \quad (9.42)$$

Быстрота откачки первого насоса из (9.41)

$$S_{n1} = Q/p_1. \quad (9.43)$$

Для описания основной характеристики насоса примем выражение (9.12). Из (9.12) и (9.43) можно найти номинальную быстроту откачки:

$$S_{m1} = \frac{Q}{p_1 - p_{np1}}. \quad (9.44)$$

Уравнение потоков (9.16) для входного сечения первого насоса

$$Q = U_1(p_A - p_1) = S_{n1}p_1. \quad (9.45)$$

Решая (9.45) относительно давления p_1 , получим с учетом выражения (4.8) для коэффициента использования насоса $K_{н1}$

$$p_1 = \frac{U_1}{U_1 + S_{n1}} p_A = K_{н1} p_A. \quad (9.46)$$

Подставляя (9.46) в (9.44), преобразуем выражение для номинальной быстроты откачки первого насоса:

$$S_{m1} = \frac{Q}{K_{н1} p_A - p_{np1}}. \quad (9.47)$$

Для любого другого последовательно включенного насоса аналогично (9.47) получим следующее выражение для определения номинальной быстроты откачки:

$$S_{mi} = \frac{Q}{K_{ни} p'_{i-1} - p_{npi}}. \quad (9.48)$$

В качестве давления p'_{i-1} можно принимать максимальное выпускное давление предыдущего насоса.

В тех случаях, когда характеристика насоса задана графически и не описывается уравнением (9.12), совместность работы на-

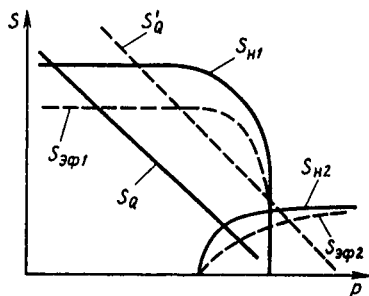


Рис. 9.7. Совместность работы двух насосов при постоянном потоке

сосов можно определить графически (рис. 9.7). По графическим характеристикам насосов S_{H1} и S_{H2} рассчитывают и строят их эффективные скорости откачки:

$$S_{эф1} = \frac{S_{H1}U_1}{S_{H1} + U_1}, \quad (9.49)$$

$$S_{эф2} = \frac{S_{H2}U_2}{S_{H2} + U_2}, \quad (9.50)$$

где U_1 — проводимость вакуумной системы от первого насоса до откачиваемого объекта; U_2 — проводимость вакуумной системы от второго насоса

до первого.

При расчетах по формулам (9.49) и (9.50) следует иметь в виду, что проводимость U в общем случае является функцией давления.

Здесь же на рис. 9.7 построена зависимость скорости натекания и газовыделения от давления в откачиваемом объекте: $S_Q = Q/P$.

Точка пересечения кривых $S_{эф1}$ и S_Q соответствует установившемуся режиму работы первого насоса. Давление в точке пересечения должно быть равно рабочему давлению первого насоса. Аналогично по пересечению кривых $S_{эф2}$ и S_Q можно найти рабочее давление второго насоса. Если оно меньше, чем максимальное выпускное давление первого насоса, то насосы работают совместно.

Из рис. 9.7 легко определить возможность запуска системы. Условием запуска системы можно считать отсутствие двойного пересечения кривых S_Q и $S_{эф1}$ в промежутке рабочих давлений. Для $S_{Q'}$ запуск системы невозможен.

В установках с переменным газовыделением и натеканием представляет интерес нахождение области совместной работы двух последовательно соединенных насосов на кривой $Q=f(p)$.

Нахождение области совместной работы насосов удобно делать графически (рис. 9.8). Считаем, что выполняется условие сплошности потока $Q_1=Q_2$, где Q_1 — производительность откачки первого насоса в вакуумной камере; Q_2 — производительность откачки второго насоса в сечении выхлопного патрубка первого насоса.

Значения Q_1 и Q_2 в функции давления можно рассчитать, воспользовавшись кривыми эффективной скорости откачки насосов $S_{эф1}$ и $S_{эф2}$ (см. рис. 9.7), по формулам $Q_1=S_{эф1}p$; $Q_2=S_{эф2}p$.

Если при максимальной производительности предыдущего насоса последующий обеспечивает на его выхлопном патрубке дав-

ление, меньшее, максимального выпускного давления предыдущего насоса, то они всегда работают совместно.

Давление p_2 , соответствующее максимальной производительности системы, находится из уравнения $(Q_1)_{\max} = Q_2(p_2)$, которое удобно решить графически, проводя на рис. 9.8 прямую, параллельную оси p (показана стрелкой), от максимума кривой $Q_1(p)$ до пересечения с кривой $Q_2(p)$. Точка пересечения с $Q_2(p)$ определяет значение p_2 .

Если $p_2 < p_{m1}$ (p_{m1} — максимальное выпускное давление первого насоса), то обеспечена полная совместность работы насосов. При $p_2 \geq p_{m1}$ совместность работы насосов сохраняется только в диапазоне давлений от $p_{\text{раб}}$ до p_{max} и потоков от $Q_{\text{раб}}$ до Q_{max} . Нахождение Q_{max} и p_{max} производится обратным построением, показанным стрелками на рис. 9.8, начиная от давления p_{m1} .

Если суммарный поток превысит Q_{max} , то в вакуумной камере произойдет скачкообразное повышение давления от p_{max} до p_{m1} . Отношение p_{m1}/p_{max} может составлять несколько порядков.

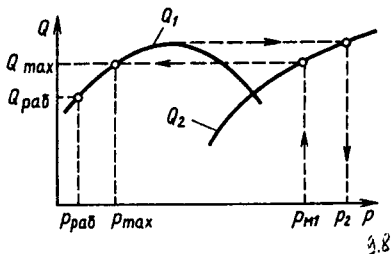


Рис. 9.8. Совместность работы двух насосов при различных величинах потоков

§ 9.4. Расчет газовых нагрузок

Стационарный газовый поток, откачиваемый насосом, во время работы вакуумной установки имеет несколько составляющих:

$$Q = Q_n + Q_d + Q_h + Q_t,$$

где Q_n — проницаемость материалов; Q_d — диффузионное газовыделение материала; Q_h — натекание через оболочку вакуумной камеры; Q_t — стационарное технологическое газовыделение.

Все составляющие газового потока либо вообще не зависят от времени работы вакуумной установки, либо изменение газового потока за время ее работы не превышает точности выполняемых расчетов.

Рассмотрим подробнее каждую из указанных составляющих.

Количественная оценка процессов стационарной проницаемости газа через стенки вакуумной системы, изготовленные из различных материалов или имеющие различную толщину, может быть сделана с учетом (2.33) и констант проницаемости K_0 и Q_p (табл. 9.1) по формуле

$$Q_n = \sum_{i=1}^N K_{0i} F_i \frac{p_2^{1/n} - p_1^{1/n}}{2h_i} \exp \frac{Q_{pi}}{nRT}, \quad (9.51)$$

Коэффициенты газопроницаемости вакуумных материалов

Материалы	n	$K_0 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{м}}{\text{Па}^{1/n} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}$	$Q_p \cdot 10^{-3} \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$
<i>Водород</i>			
Fe	2	$1,4 \cdot 10^{-4}$	80,4
Ni	2	$3,0 \cdot 10^{-3}$	115
Pd	2	$1,2 \cdot 10^{-3}$	88,8
Cu	2	$2,0 \cdot 10^{-4}$	139
Pt	2	$1,0 \cdot 10^{-3}$	15,1
Al	2	$3,6 \cdot 10^{-2}$	360
Каучук	1	$5,1 \cdot 10^{-5}$	28,9
Кварц	1	$2,2 \cdot 10^{-10}$	36,0
<i>Азот</i>			
Fe	2	$3,8 \cdot 10^{-4}$	199
Каучук	1	$1,5 \cdot 10^{-5}$	27,2
Резина:			
7889	1	$3,0 \cdot 10^{-7}$	26,0
9024	1	$0,9 \cdot 10^{-3}$	51,5
ИРП-1015	1	$2,3 \cdot 10^{-4}$	49,9
ИРП-1368	1	$1,0 \cdot 10^{-8}$	8,80
ИРП-2043	1	$1,3 \cdot 10^{-5}$	42,3
<i>Кислород</i>			
Ag	2	$3,4 \cdot 10^{-3}$	189
Каучук	1	$1,0 \cdot 10^{-5}$	31,4
<i>Оксид углерода</i>			
Fe	2	$1,1 \cdot 10^{-4}$	156
<i>Гелий</i>			
Пирекс	1	$2,3 \cdot 10^{-10}$	20,1
Каучук	1	$1,5 \cdot 10^{-6}$	27,2
Кварц	1	$32 \cdot 10^{-10}$	22,8

где K_{0i} и Q_{pi} — соответственно константа проницаемости и теплота активации для материала i -й стенки вакуумной системы; F_i и h_i — соответственно площадь и половина толщины i -й стенки; p_1 и p_2 — давления с внутренней и наружной сторон стенок; n — число атомов в молекуле газа, проникающего через стенку; T — абсолютная температура стенки; $R = 8,31$ кДж/(кмоль·К); N — число стенок вакуумной камеры, арматуры и трубопроводов, изготовленных из различного материала или имеющих разную толщину.

Газопроницаемость возрастает при уменьшении толщины стенок вакуумных камер. Особенно это заметно для деталей типа сильфонов, мембран и т. д., где малая толщина детали определя-

ется условиями ее работы. Конструктивными способами уменьшения газопроницаемости кроме выбора материалов являются использование установок с «двойным» вакуумом и охлаждение деталей во время работы непосредственно в вакуумной камере.

Т а б л и ц а 9.2

Удельное диффузионное газовыделение конструкционных материалов при комнатной температуре

Материалы	Обработка	Удельное газовыделение через час после откачки, q_{cp} , м ³ ·Па/(м ² ·с)	Коэффициенты	
			A	B
Сталь нержавеющая	Без обработки	$4 \cdot 10^{-5}$	4,1	$8,3 \cdot 10^{-5}$
	Вакуум, 450°C, 15 ч	$10^{-8} \dots 10^{-10}$	—	—
Сталь конструкционная	Без обработки	$4 \cdot 10^{-4}$	—3,2	$4,2 \cdot 10^{-5}$
	Хромирование Вакуум, 450°C, 15 ч	$1,3 \cdot 10^{-7}$ $10^{-8} \dots 10^{-10}$	—	—
Медь	Без обработки	$2 \cdot 10^{-4}$	—3,5	$4,0 \cdot 10^{-5}$
	Вакуум, 450°C, 15 ч	$10^{-8} \dots 10^{-10}$	—	—
Латунь	Без обработки	$3 \cdot 10^{-4}$	—3,4	$3,1 \cdot 10^{-5}$
Алюминий	То же	$6 \cdot 10^{-6}$	—	—
Никель	»	$7 \cdot 10^{-6}$	—	—
Резина вакуумная	»	10^{-2}	—	—
Полиэтилен	»	10^{-4}	—	—
Фторопласт	»	$3 \cdot 10^{-4}$	—	—

Примечание: 1) $1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ л} \cdot \text{торр} / (\text{см}^2 \cdot \text{с})$; 2) $\lg q_{cp} = A - Bt$, где t — время, с.

Диффузионное газовыделение имеет нестационарную природу, но для большинства газов и материалов постоянная времени этих процессов настолько велика, что они могут рассматриваться как стационарные. Упрощенный метод определения диффузионного газовыделения основан на применении экспериментально определенных значений коэффициентов удельного диффузионного газовыделения (табл. 9.2), зависящих от рода газа, материала и его предварительной обработки, а также рабочей температуры. Газовый диффузионный поток

$$Q_d = \sum_{i=1}^N q_i F_i = q_{cp} \sum_{i=1}^N F_i, \quad (9.52)$$

где F_i — площадь i -го материала, присутствующего в вакуумной системе; N — число материалов; q_{cp} — среднее удельное диффузи-

онное газовыделение материалов вакуумной системы:

$$q_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i}.$$

Натекание через оболочку вакуумной камеры происходит в основном по разборным и неразборным соединениям, которые принципиально не могут обеспечить абсолютную герметичность. Натекание может происходить и по дефектам в структуре сплошного материала. Поэтому возможное натекание в вакуумную установку можно оценить по формуле

$$Q_n = K_b N Q_{\text{ти}} / m, \quad (9.53)$$

где $Q_{\text{ти}}$ — минимальный поток, регистрируемый теческателем (табл. 9.3); K_b — вероятность существования течи, меньшей чувствительности теческателя; N — число соединений; m — число одновременно проверяемых соединений.

Т а б л и ц а 9.3

Потоки газов, регистрируемые теческателями

Тип теческателей	Наименьший регистрируемый поток, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$	Назначение
Масс-спектрометрический	10^{-11}	Испытание объектов, допускающих откачку
То же, с дросселированием откачки	10^{-12}	То же
То же, с накоплением	10^{-13}	Испытание небольших объектов, допускающих откачку
Галогенный с атмосферным преобразователем	10^{-7}	Проверка полостей, заполненных галогеносодержащими веществами
Галогенный с вакуумным преобразователем	10^{-9}	Испытания объектов, допускающих откачку
Искровой теческатель	10^{-5}	Испытания вакуумных систем со стеклянными элементами

Резервом уменьшения Q_n при расчете по формуле (9.53) является уменьшение числа испытаний на герметичность. Предельным случаем является одно испытание, когда $m=N$, и проверяется негерметичность всей установки. При работе с гелиевым теческателем такая проверка производится размещением всей установки в атмосфере гелия с помощью полиэтиленовых колпаков или других вспомогательных средств, зависящих от размеров установки.

Технологическое газовыделение зависит от типа обрабатываемого объекта и способа осуществления технологического процесса. В проектировочных расчетах его значение принимается постоянным в течение всего времени стационарного режима t_2 .

Для проектировочного расчета стационарный газовый поток выбирается по аналогии со сходными по назначению вакуумными установками. После окончания проектировочного расчета и разработки конструкции вакуумной установки производят проверочный расчет, уточняя стационарный газовый поток.

§ 9.5. Выбор коэффициента использования насоса при стационарном режиме работы

Для любой вакуумной установки можно определить оптимальное значение коэффициента использования насоса из экономических соображений. При этом необходимо учитывать, что при увеличении коэффициента использования насоса уменьшаются затраты, связанные с приобретением и эксплуатацией вакуумных насосов, но увеличиваются расходы на изготовление трубопроводов и арматуры.

Себестоимость откачки камеры с быстротой $1 \text{ м}^3/\text{с}$ в течение 1 ч [$\text{руб} \cdot \text{ч}^{-1}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1})$]

$$C = \frac{(C_n + C_a)/t_0 + (Z_n + Z_a)}{S_{\text{эф}}}; \quad (9.54)$$

здесь t_0 — нормативный срок амортизационных отчислений, ч; C_n — стоимость насоса, руб. ($C_n = C_1 S_n^{K_1}$); C_a — стоимость трубопроводов, затворов, ловушек и другой вспомогательной арматуры, руб. ($C_a = C_2 U^{K_2}$); Z_n — эксплуатационные расходы на насос, руб/ч ($Z_n = C_3 S_n^{K_3}$); Z_a — эксплуатационные расходы на арматуру, руб/ч ($Z_a = C_4 U^{K_4}$); где C_1, C_2, C_3, C_4 и K_1, K_2, K_3, K_4 — постоянные, зависящие от условий производства и эксплуатации вакуумного оборудования (рис. 9.9...9.13).

С учетом записанных выражений уравнение (9.54) примет вид

$$C = A_1 K_n^{-K_1} + A_2 (1 - K_n)^{-K_2} + A_3 K_n^{-K_3} + A_4 (1 - K_n)^{-K_4}, \quad (9.55)$$

где

$$A_1 = \frac{C_1 S_{\text{эф}}^{(K_1-1)}}{t_0}; \quad A_2 = \frac{C_2 S_{\text{эф}}^{(K_2-1)}}{t_0};$$

$$A_3 = C_3 S_{\text{эф}}^{(K_3-1)}; \quad A_4 = C_4 S_{\text{эф}}^{(K_4-1)}.$$

Стоимость вакуумных насосов зависит от их принципа действия и быстроты откачки. Из современных вакуумных насосов наибольшую стоимость имеют турбомолекулярные, наименьшую —

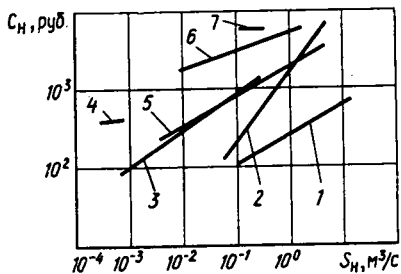


Рис. 9.9. Стоимость вакуумных насосов различных типов в зависимости от их быстроты откачки: 1 — пароструйные; 2 — гетеронные; 3 — вращательные (старой серии); 4 — вращательные (новой серии); 5 — двухроторные; 6 — магнетронные; 7 — турбомолекулярные

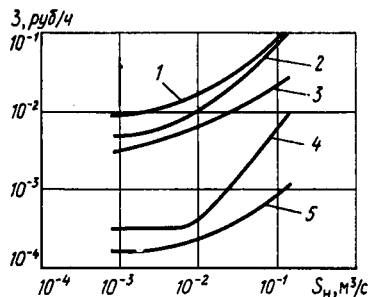


Рис. 9.10. Эксплуатационные расходы вращательных насосов типа ВН с различной быстротой откачки: 1 — общие расходы; 2 — расходы на электроэнергию; 3 — расходы на зарплату; 4 — расходы на материалы; 5 — расходы на ремонт

пароструйные. Затраты на единицу быстроты откачки для различных насосов могут отличаться в 10^2 раз. Насосы, имеющие высокую стоимость, обеспечивают остаточную газовую среду, свободную от загрязнения парами рабочих жидкостей, и используются в тех случаях, когда применение дешевых насосов не обеспечивает качество выпускаемых изделий или не обеспечивает условия проведения экспериментов.

Эксплуатационные расходы вакуумных насосов состоят из затрат на энергоносители, материалы, зарплату постоянному обслуживающему персоналу, профилактические осмотры и ремонт, вызванный отказами оборудования.

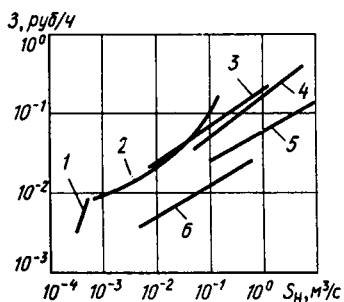


Рис. 9.11. Эксплуатационные расходы вакуумных насосов с различной быстротой откачки: 1 — вращательные (новой серии); 2 — вращательные (старой серии); 3 — двухроторные; 4 — гетеронные; 5 — пароструйные; 6 — магнетронные

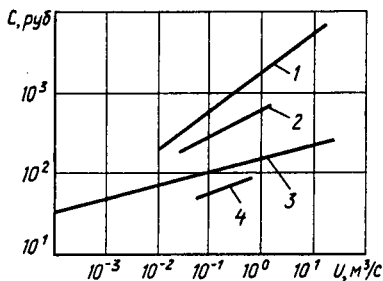


Рис. 9.12. Стоимость вакуумной арматуры в зависимости от пропускной способности: 1 — запорная арматура для высокого вакуума; 2 — сорбционные ловушки; 3 — запорная арматура для низкого вакуума; 4 — азотные ловушки

Нормативный срок амортизационных отчислений t_0 можно принять равным 10 годам, что при коэффициенте использования рабочего времени 0,85 и трехсменной работе соответствует 53 520 ч.

Стоимость и эксплуатационные затраты могут быть подсчитаны с помощью коэффициентов C_1, \dots, C_4 и K_1, \dots, K_4 , приведенных в табл. 9.4 и 9.5.

Таблица 9.4

Стоимостные коэффициенты вакуумных насосов

Типы насосов	C_1	K_1	C_3	K_3
	руб./($m^3 \cdot c^{-1}$) $-K_1$	—	руб. $\cdot c^{-1}/(m^3 \cdot c^{-1})-K_3$	—
Пароструйные	260	0,478	$5,4 \cdot 10^{-2}$	0,330
Гетероинные	1680	0,900	$1,52 \cdot 10^{-1}$	0,517
Вращательные	3130	0,500	$3,17 \cdot 10^{-1}$	0,500
Двухторные	2120	0,427	$1,85 \cdot 10^{-1}$	0,451
Магниторазрядные	4650	0,206	$3,16 \cdot 10^{-2}$	0,417

Таблица 9.5

Стоимостные коэффициенты вакуумной арматуры

Типы арматуры	C_2	K_2	C_4	K_4
	руб./($m^3 \cdot c^{-1}$) $-K_2$	—	руб. $\cdot c^{-1}/(m^3 \cdot c^{-1})-K_4$	—
Запорная арматура для вакуума:				
низкого	125	0,117	$8 \cdot 10^{-4}$	0,077
высокого	2160	0,50	$8 \cdot 10^{-4}$	0,077
Ловушки:				
азотные	100	0,2	$3,4 \cdot 10^{-2}$	0,20
адсорбционные прогреваемые	558	0,25	$5 \cdot 10^{-3}$	0,16

Дифференцируя (9.55) по K_n и приравнявая полученное выражение нулю, получим условие экстремума:

$$\frac{dC}{dK_n} = -A_1 K_1 K_n^{-(K_1+1)} + A_2 K_2 (1 - K_n)^{-(K_2+1)} - A_3 K_3 K_n^{-(K_3+1)} + A_4 K_n (1 - K_n)^{-(K_4+1)} = 0. \quad (9.56)$$

Из уравнения (9.56) можно найти оптимальное значение коэффициента использования K_n , соответствующего минимальной себестоимости откачки.

Рассмотрим упрощенный случай, когда $K_1 = K_2 = K_3 = K_4$, при этом для определения K_n можно получить уравнение

$$(1 - A_3) K_n^2 - 2K_n + 1 = 0, \quad (9.57)$$

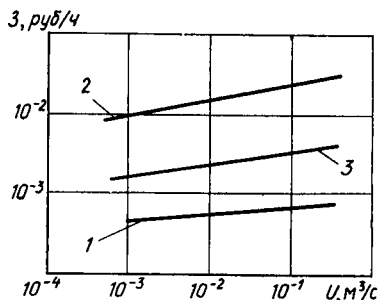


Рис. 9.13. Эксплуатационные расходы вакуумной арматуры в зависимости от проводимости:

1 — запорная арматура; 2 — азотные ловушки; 3 — сорбционные ловушки

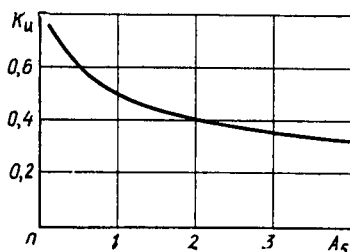


Рис. 9.14. Оптимальные значения коэффициента использования насоса K_n от соотношения затрат на арматуру и откачные средства

где

$$A_5 = \frac{C_2 + C_4 t_0}{C_1 + C_3 t_0}$$

Коэффициент A_5 представляет собой отношение затрат на приобретение и эксплуатацию арматуры к затратам на приобретение и эксплуатацию насосов. При $A_5 = 1$ следует очевидное значение для коэффициента $K_n = 0,5$.

Таблица 9.6

Средние значения коэффициентов использования насосов в различных типах вакуумных машин и установок

Типы установок	Значения коэффициентов	
	K_{n1}	K_{n2}
Автоматы откачки электровакуумных приборов	0,05 ... 0,001	0,1 ... 0,2
Откачные посты для откачки электровакуумных приборов	0,1 ... 0,2	0,8 ... 0,9
Установки камерной откачки электровакуумных приборов	0,8 ... 0,9	0,8 ... 0,9
Напылительные установки	0,5 ... 0,6	0,7 ... 0,8
Установки:		
для термовакуумной обработки	0,5 ... 0,7	0,7 ... 0,9
электронно-лучевой сварки	0,3 ... 0,5	0,5 ... 0,8
имитации космического пространства	0,5 ... 1,0	0,5 ... 0,9

Учитывая, что K_n всегда меньше единицы, найдем решение уравнения (9.57) в виде

$$K_n = (1 - \sqrt{A_5}) / (1 - A_5) \quad (9.58)$$

Для наглядности зависимость (9.58) представлена на рис. 9.14.

В тех случаях, когда из-за отсутствия стоимостных коэффициентов приведенная выше методика определения оптимальных коэффициентов использования неприменима, их выбор в стационарном режиме работы для высоковакуумных ($K_{н1}$) и низковокуумных ($K_{н2}$) насосов можно делать по аналогии с существующими системами (табл. 9.6).

§ 9.6. Типовые схемы вакуумных установок

Среди большого количества вакуумных систем, используемых в производстве и научных исследованиях, можно выделить несколько типовых систем, предназначенных для получения низкого, среднего, высокого и сверхвысокого вакуума. Для принципиальных схем вакуумных установок пользуются условными обозначениями элементов вакуумных систем, приведенными в табл. П.13.

Вакуумная система для получения низкого вакуума (рис. 9.15) обеспечивает в вакуумной камере рабочее давление от 10^5 до 10^1 Па. Тип насоса *I* выбирают по предельному давлению (табл. 9.7) и составу остаточных газов (рис. 9.16) современных низковокуумных насосов.

Т а б л и ц а 9.7

Основные характеристики насосов для получения низкого вакуума

Типы насосов	Обозначение	Предельное давление, Па	Быстрота действия, м ³ /с
Центробежный	ЭП	$10^5 \dots 10^4$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$
Воздухоструйный	ВВН	$2 \cdot 10^3$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$
Водоструйный	ВВИ	$2 \cdot 10^3$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$
Водокольцевой насос	ВКН	$2 \cdot 10^3 \dots 10^4$	$10^{-2} \dots 8 \cdot 10^{-1}$
Вращательный многопластинчатый	ДРВН	$5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^{-2} \dots 10^0$
Вращательный масляный	ВН	$5 \cdot 10^0 \dots 2 \cdot 10^2$	$10^{-3} \dots 10^{-1}$
Криоадсорбционный	АН	$10^5 \dots 10^0$	$10^{-3} \dots 10^{-1}$

Для повышения надежности, а также в случае применения криоадсорбционного насоса, способного поглотить ограниченное количество откачиваемого газа, элементы схемы *1, 2, 5* дублируются. Дополнительные элементы показаны на рис. 9.15 пунктиром.

Клапан *2* позволяет выровнять давления на входном и выходном патрубках насосов с рабочей жидкостью во время их остановки или выпустить в атмосферу газ, десорбируемый при отогреве криоадсорбционного насоса.

Предохранительная камера *3* используется для механических

насосов и представляет собой ловушку для паров рабочей жидкости насоса или балластный объем, предотвращающий аварийное проникновение в вакуумную камеру рабочей жидкости насосов. Для насосов других типов не используется. Манометр 4 позволяет в случае необходимости определить работоспособность вакуумного насоса. Клапан 5 отключает вакуумную камеру от насоса после достижения в ней рабочего давления и позволяет дросселировать процесс откачки, предотвращая перегрев механических насосов во время работы при высоких давлениях.

Вакуумная камера 6 может иметь необходимое количество вводов движения 7 и электрических вводов 8. Манометр 9 регистрирует рабочее давление в вакуумной камере и может быть использован для определения при открытом клапане 5 эффективной быстроты откачки насоса и при закрытом клапане 5 — быстроты суммарного газовыделения и натекания в вакуумной камере. Клапан 10 предназначен для напуска воздуха в вакуумную камеру.

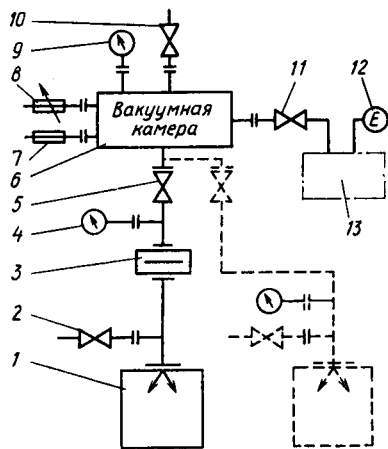


Рис. 9.15. Вакуумная система для получения низкого вакуума ($10^5 \dots 10^1$ Па):

1 — насос; 2, 5, 10, 11 — клапаны; 3 — предохранительная камера; 4, 9 — манометры; 6 — откачиваемый объект; 7 — ввод движения; 8 — электрический ввод; 12 — газоанализатор; 13 — вспомогательная вакуумная система

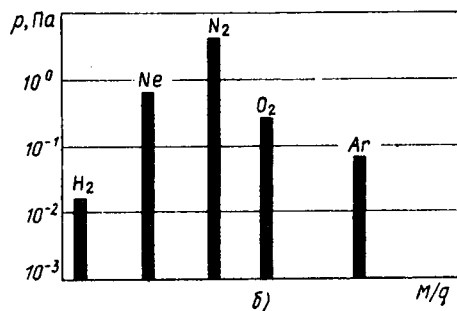
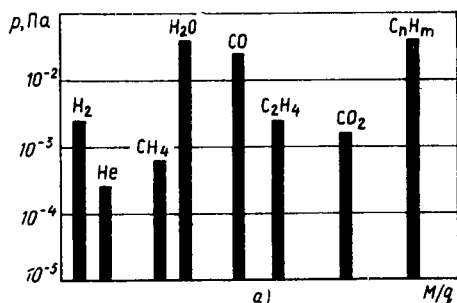


Рис. 9.16. Состав остаточных газов в низковакуумных системах с различными средствами откачки:

а — низковакуумные механические масляные насосы; б — адсорбционные насосы

В процессе наладки установки к клапану 10 может подключаться теченскатель.

В случае необходимости регистрации парциальных давлений всех газов, присутствующих в вакуумной камере, через клапан 11 подключается газоанализатор 12. Вспомогательная вакуумная система 13 необходима

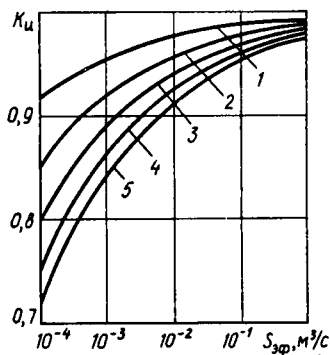


Рис. 9.17. Рекомендуемые коэффициенты использования $K_{ц}$ вращательных насосов в низовакуумных системах в зависимости от эффективной скорости действия $S_{эф}$ и числа элементов на участке от насоса до откачиваемого объекта n

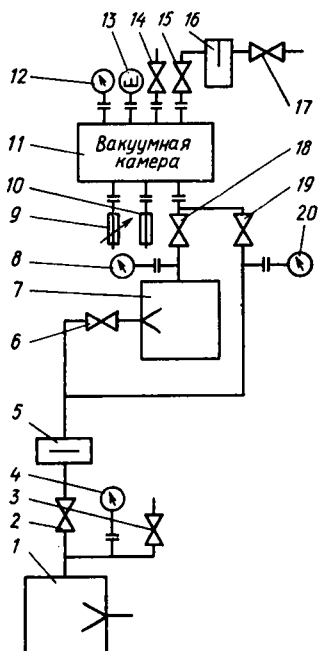


Рис. 9.18. Вакуумная система для получения низкого и среднего вакуума ($10^3 \dots 10^{-2}$ Па):

1 — насос предварительного разрежения; 2, 3, 6, 14, 15, 17, 18, 19 — вакуумные клапаны; 4, 8, 12, 20 — манометры; 5 — масляный разражатель; 7 — насос для получения среднего вакуума; 9 — электрический ввод; 10 — ввод движения; 11 — вакуумная камера; 13 — газоанализатор; 16 — гироскопатор

для снижения давления анализируемой смеси газов, так как современные вакуумные газоанализаторы могут работать при общем давлении не выше 10^{-1} Па.

Коэффициент использования насоса выбирают в соответствии с методикой, изложенной в § 9.5. Стоимость участка вакуумной системы между насосом и откачиваемым объектом зависит от числа последовательно соединенных элементов. На рис. 9.17 приведены значения оптимальных коэффициентов использования насоса в зависимости от требуемой эффективной скорости откачки для различного числа элементов на участке вакуумной системы между насосом и откачиваемым объектом.

Вакуумная система для получения низкого и среднего вакуума (рис. 9.18) имеет два вакуумных насоса. Насос 7 обеспечива-

ет получение среднего вакуума, а насос 1 создает предварительное разрежение. В качестве насоса для получения среднего вакуума могут применяться двухроторные, парожеткорные и адсорбционные насосы (табл. 9.8). Насос 1 должен обеспечивать получение низкого вакуума. Быстрота действия и предельное давление насоса предварительного разрежения должны быть согласованы с характеристиками насоса для получения среднего

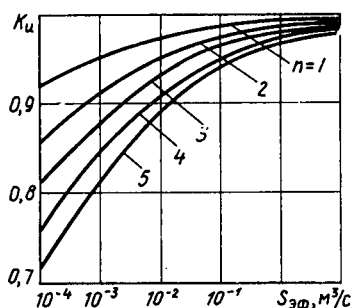


Рис. 9.19. Оптимальные коэффициенты использования двухроторных насосов в зависимости от эффективной скорости действия $S_{эф}$ и числа элементов на участке от насоса до откачиваемого объекта n

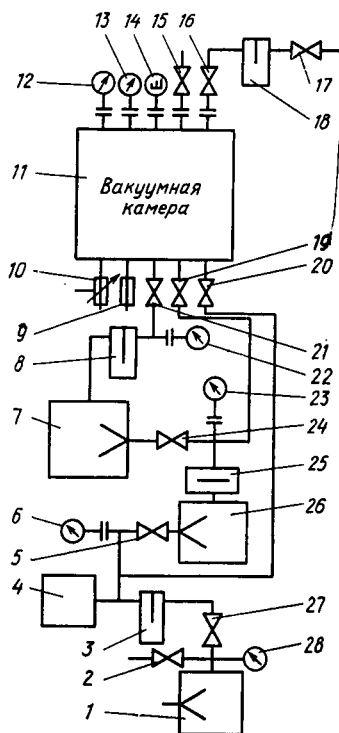


Рис. 9.20. Вакуумная система для получения низкого, среднего и высокого вакуума ($10^5 \dots 10^{-5}$ Па):

1 — насос для получения низкого вакуума; 2, 5, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 24, 27 — клапаны; 3, 8, 25 — ловушки; 4 — форвакуумный баллон; 6, 12, 13, 22, 23, 28 — манометры; 7 — насос для получения высокого вакуума; 9 — ввод движения; 10 — электрический ввод; 11 — откачиваемый объект; 14 — газоанализатор; 18 — гигроскопатор; 26 — насос для получения среднего вакуума

вакуума. Оптимальные значения коэффициентов использования двухроторных насосов в зависимости от эффективной скорости откачки и числа последовательно соединенных элементов приведены на рис. 9.19.

При остановке насоса 1 (рис. 9.18), закрывая клапан 2 и открывая клапан 3, можно выравнивать давление на его входном и выходном патрубках. Манометр 4 необходим для проверки работоспособности насоса 1. Отражатель 5 предотвращает проникновение паров рабочей жидкости насоса 1 в насос 7 и вакуумную камеру 11. Клапаны 6, 18, 19 позволяют работать в режимах «прямой» и «обходной» откачки, соответствующих прохождению

Основные характеристики насосов
для получения среднего вакуума

Типы насосов	Обозначение	Предельное давление, Па	Быстрота действия, м ³ /с
Двухроторный	ДВН	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3} \dots 5$
Бустерные пароструйные	БН	$5 \cdot 10^{-4}$	0,45 ... 15
Криoadсорбционные	АН	$10^0 \dots 10^{-3}$	$10^{-3} \dots 5$

Таблица 9.9

Основные характеристики высоковакуумных насосов

Типы насосов	Обозначение	Предельное давление, Па	Быстрота действия, м ³ /с
Пароструйные	Н	$10^{-4} \dots 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3} \dots 40$
Турбомолекулярные	ТМН	$10^{-6} \dots 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-2} \dots 5$
Гетероионные	ГИН	$5 \cdot 10^{-7}$	0,45 ... 4,5

откачиваемого газа через оба насоса или через один насос предельного разрежения. В последнем случае в откачиваемом объекте обеспечивается получение низкого вакуума.

Манометр 20 позволяет определить эффективность работы отражателя 5, а манометр 8 при закрытом клапане 18 контролирует предельное давление насоса 7.

Вакуумная камера снабжена электрическими 9 и механическими 10 вводами, манометром 12, газоанализатором 13, клапаном 14 для подключения течейскаателя и клапанов 15, 17 с гигроскопатором 16 для напуска воздуха в вакуумную камеру. Гигроскопатор 16 предотвращает попадание в вакуумную камеру паров воды, содержащихся в атмосферном воздухе, что существенно сокращает время откачки вакуумной камеры до рабочего давления.

Вакуумная система для получения низкого, среднего и высокого вакуума (рис. 9.20) содержит все элементы предыдущей схемы и дополнительный высоковакуумный насос 7 (табл. 9.9). В качестве высоковакуумного насоса могут применяться пароструйные, турбомолекулярные и гетероионные. Состав остаточных газов пароструйного и турбомолекулярного насосов показан на рис. 9.21. Ловушка 8 (рис. 9.20) предотвращает проникновение паров рабочей жидкости пароструйных насосов в вакуумную камеру. Для турбомолекулярных и гетероионных насосов ловушка 8 не устанавливается. Клапан 21 коммутирует насос с вакуумной камерой. Манометр 22 позволяет контролировать эффективность работы насоса 7 и ловушки 8 при закрытом клапане 21. Манометры 12 и 13 измеряют давление в вакуумной камере соответ-

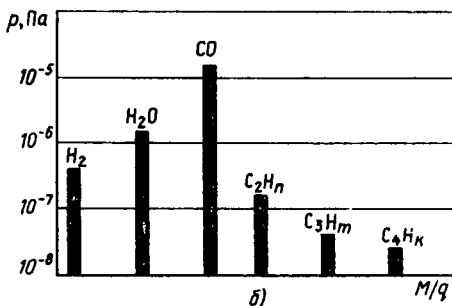
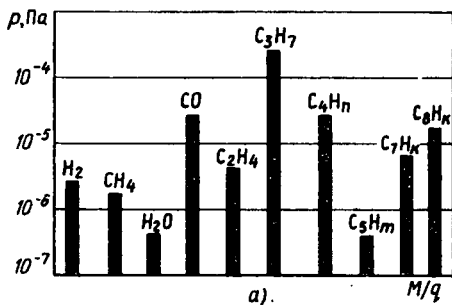


Рис. 9.21. Состав остаточных газов вакуумных систем с различными средствами откачки:

а — пароструйные; б — турбомолекулярные

ственно в области среднего и высокого вакуума. Для обеспечения в вакуумной камере высокого вакуума все насосы включаются последовательно. Если в камере необходимо получить средний вакуум, то насос 26 подключается через клапан 19 к откачиваемому объекту. При этом клапан 24 может быть закрыт. Аналогично, через клапаны 20 и 5 низковакуумный насос непосредственно подключается к откачиваемому объекту или к насосу 26. При работе системы в режиме высоковакуумной откачки газовые потоки очень малы. Это позволяет отключить насос 1 на длительное время и работать на форвакуумный баллон 4. Схему можно упростить за счет сокращения коммутационной аппаратуры 5, 19, 20, 21, 24, однако это значительно снизит производительность работы

системы в нестационарных режимах.

Если система предназначена для работы только в области высокого вакуума, то насос 26 с манометром 23 и клапанами 19 и 24 из схемы можно исключить. В этом случае увеличится время откачки вакуумной камеры до рабочего давления. Рекомендации по выбору оптимальных коэффициентов использования высоковакуумных насосов приведены на рис. 9.22.

Вакуумная система для получения сверхвысокого вакуума (рис. 9.23) содержит прогреваемый вакуумный блок 7. Прогрев до 400°C уменьшает газовыделение всех элементов вакуумной системы, непосредственно подключаемых к сорбционному насосу 4. Состав остаточных газов сверхвысоковакуумных систем показан на рис. 9.24. Основные характеристики сверхвысоковакуумных насосов приведены в табл. 9.10.

Камера снабжена несколькими манометрами 9, 10, 11, обеспечивающими измерение давления от атмосферного до сверхвысокого вакуума. Манометр 5 контролирует работоспособность насоса 4. Высоковакуумная часть системы собирается на двух насосах: 18 и 1. В качестве высоковакуумного насоса 18 можно использовать пароструйный насос с ловушкой 17 или турбомолеку-

лярный насос без ловушки. Клапан 16 служит для подключения течейскаателя к вакуумной системе, а манометры 14 и 15 — для измерения давления в области среднего и высокого вакуума. В качестве низковакуумного насоса 1 чаще всего используется вращательный насос. Схема высоковакуумной откачки максимально упрощена, так как используется только в нестационарном режиме при запуске установки.

В тех случаях, когда требуется повышенная надежность системы по предотвращению попадания паров рабочей жидкости в вакуумную камеру, в качестве предварительной системы откачки используются агрегаты с криоадсорбционными насосами.

Оптимальные значения коэффициентов использования сверхвысоковакуумных насосов в зависимости от их быстроты действия в откачиваемом объекте и числа элементов в схеме между насосом и откачиваемым объектом приведены на рис. 9.25.

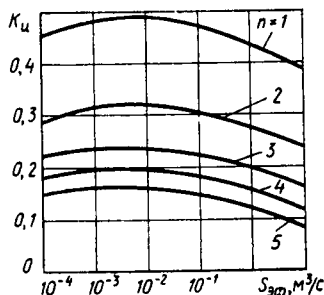


Рис. 9.22. Оптимальные коэффициенты использования вакуумных пароструйных насосов в зависимости от эффективной быстроты действия $S_{эф}$ и числа элементов между насосом и откачиваемым объектом n

Таблица 9.10

Основные характеристики сверхвысоковакуумных насосов

Типы насосов	Обозначение	Предельное давление, Па	Быстрота действия, м³/с
Пароструйные с ловушками	ПН	10^{-8}	$5 \cdot 10^{-3} \dots 0,5$
Магниторазрядные	НМД	$5 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-3} \dots 1,2$
Орбитронные	ВНО	10^{-8}	$0,1 \dots 0,5$
Криоконденсационные	КН	10^{-11}	$0,5 \dots 40$

Централизованными системами откачки называют вакуумные системы, в которых выпускное давление для нескольких включенных параллельно высоковакуумных насосов обеспечивается работой одного насоса предварительного разрежения. Они применяются в помещениях с большим количеством однородного вакуумного оборудования, в автоматах откачки и т. д.

Трехтрубпроводная централизованная система откачки показана на рис. 9.26. Вакуумные камеры V_1, \dots, V_n откачиваются высоковакуумными насосами $П_1, \dots, П_n$ через автоматические клапаны K_1, \dots, K_n . Присоединение высоковакуумных насосов к трубопроводу III предварительного разрежения производится автоматическими клапанами B_1, \dots, B_n . Трубопроводы I и II служат для предварительной откачки воздуха из вакуумных установок.

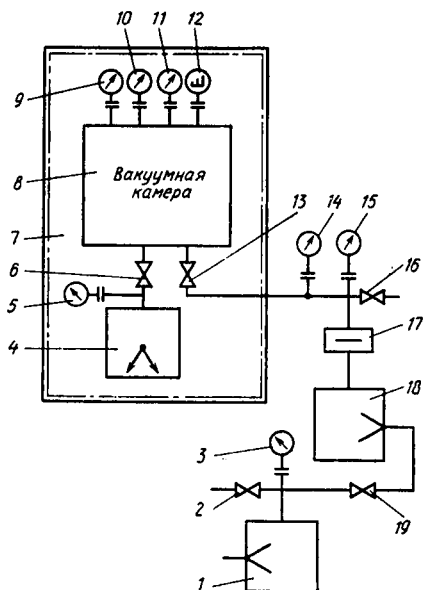


Рис. 9.23. Вакуумная система для получения сверхвысокого вакуума:

1 — насос для получения низкого вакуума; 2, 6, 13, 16, 19 — клапаны; 3, 5, 9, 10, 11, 14, 15 — манометры; 4 — насос для получения сверхвысокого вакуума; 7 — вакуумный блок прогреваемый до 400°С; 8 — откачиваемый объект; 12 — газоанализатор; 17 — ловушка; 18 — насос для получения высокого вакуума

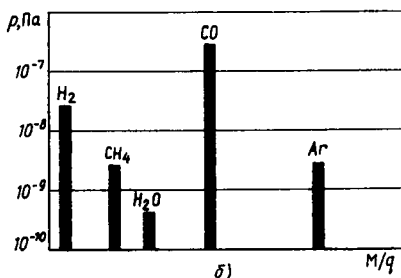
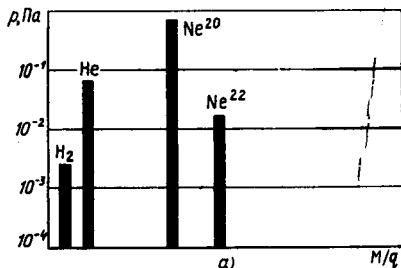


Рис. 9.24. Состав остаточных газов сверхвысоковакуумных систем:

а — с криосорбционными, б — с магнито-разрядными насосами

С помощью трубопровода I давление понижается от атмосферного до 10^2 Па, а с помощью II — от 10^2 до 5 Па.

Каждый трубопровод откачивается одним механическим насосом. Трубопроводы II и III имеют двухроторные насосы. Резервный агрегат может быть подключен к любому из трех трубопроводов.

Включение и работа централизованной вакуумной системы для откачки вакуумной камеры V_1 осуществляются в следующем порядке:

1) откачка в течение 2...3 мин от атмосферного давления через трубопровод I, затвор D_1 открыт, C_1 , K_1 и E_1 закрыты, клапан B_1 открыт, высоковакуумные насосы $П_1$ приготавливаются к работе;

2) с помощью реле времени производится переключение с трубопроводов I на II, при этом затвор D_1 закрывается, затвор C_1 открывается, откачка ведется до давления ~ 5 Па;

3) манометрический преобразователь M_{11} , например типа МТ-6, в схеме блокировочного вакуумметра при давлении ~ 5 Па

подключает к установке паромасляный насос Π_1 , при этом затворы B_1 и C_1 закрываются, затворы E_1 и K_1 открываются;

4) после того как в объеме получено рабочее давление, паромасляные насосы в помощь манометра M_{12} переключаются на трубопровод III, при этом затвор E_1 закрывается, а B_1 открывается.

Для бесперебойной работы централизованной вакуумной системы при аварии могут применяться две защиты: 1) централизованного трубопровода от вакуумных установок; 2) вакуумных установок от централизованного трубопровода.

Первая защита срабатывает от вакуумных реле M_{11}, \dots, M_{1n} при давлении в вакуумной установке выше допустимого (для пароструйных насосов $\sim 6 \dots 8$ Па); при этом клапаны K_1, \dots, K_n автоматически закрываются. Вторая защита срабатывает от вакуумного реле P_2 или P_3 , установленного в централизованных трубопроводах, если давление в нем превысит то же самое допустимое значение; при

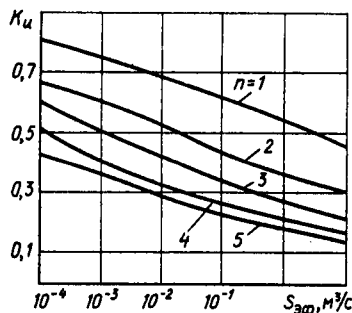


Рис. 9.25. Оптимальные коэффициенты использования сверхвысоковакуумных насосов в зависимости от их эффективной скорости откачки $S_{эф}$ и числа элементов в схеме между насосом и откачиваемым объектом n

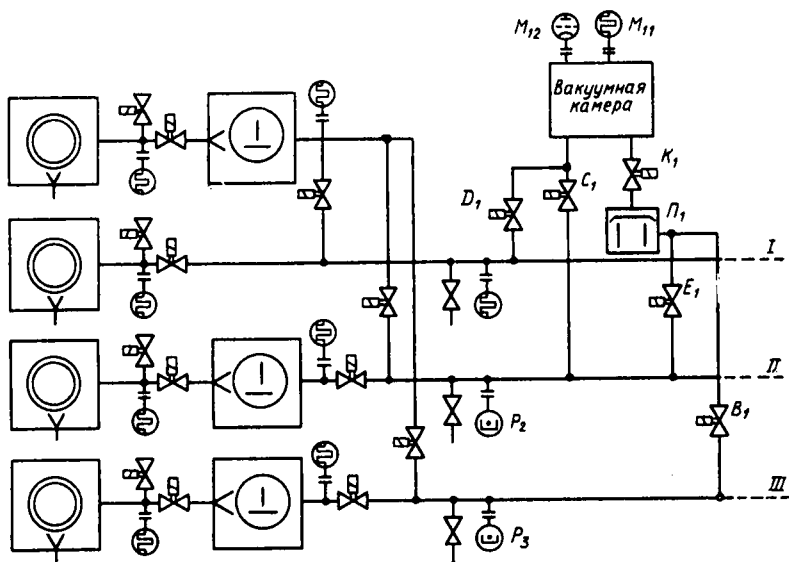


Рис. 9.26. Централизованная трехтрубопроводная система откачки

этом клапаны B_1, \dots, B_n или E_1, \dots, E_n автоматически закрываются.

В качестве реле $P_2, P_3, M_{11}, \dots, M_{1n}$ могут применяться манометрические преобразователи, имеющие релейную характеристику.

Централизованные откачные системы в описанном виде рассчитаны на применение высоковакуумных насосов, требующих непрерывного предварительного разрежения. Для высоковакуумных сорбционных насосов централизованная система откачки может работать без трубопровода III.

Если число вакуумных установок не слишком велико или их общий объем соизмерим с объемом централизованного трубопровода, то можно отказаться от трубопровода I. Таким образом, могут применяться двух- и однотрубопроводные централизованные системы откачки.

Экономические соображения позволяют определить целесообразность применения защит при аварии. Если вероятность аварии мала, а ее последствия легкоустранимы, то эксплуатация обеих или одной из защит оказывается нерентабельной.

§ 9.7. Проверочный расчет вакуумной системы в стационарном режиме работы

Задачей проверочного расчета является определение распределения давления в известной вакуумной системе. Проверочный расчет осуществляется для определения характеристик существующих вакуумных систем или уточнения проектировочных расчетов. Исходными данными являются: 1) вакуумная схема; 2) спецификация элементов вакуумной системы и их характеристики (в том числе откачиваемых объектов); 3) спецификации материалов, используемых в вакуумной системе, и их удельные газовыделения; 4) минимальный поток $Q_{\text{ти}}$, регистрируемый течеискателем; 5) число проверяемых соединений m ; 6) технологическое газовыделение Q_m .

Проверочный расчет можно разделить на несколько этапов, выполняемых в такой последовательности: 1) определение собственного газовыделения; 2) расчет распределения давления; 3) графическая проверка правильности выбора насосов; 4) проверка возможности запуска установки; 5) определение области совместной работы вакуумных насосов; 6) расчет себестоимости откачки.

Собственное газовыделение вакуумной системы складывается из газопроницаемости и диффузионного газовыделения конструкционных материалов $Q_{\text{п}}$, $Q_{\text{д}}$, а также натекания $Q_{\text{н}}$ через оболочку вакуумной системы. Оно определяет предельное давление, которое может быть получено в вакуумной установке.

Газопроницаемость определяют по (9.51) и табл. 9.1, а диффузионное газовыделение — по (9.52) и табл. 9.2.

Для определения возможного натекания в вакуумную систему Q_n воспользуемся формулой (9.53), в которой K_b — вероятность существования течи, меньшей чувствительности течеискателя; ее можно выбрать равной 0,2, а число испытаний на герметичность m равно числу разборных и неразборных соединений. Минимальный поток $Q_{тн}$, регистрируемый течеискателем, определяется типом течеискателя (табл. 9.2). При расчете следует определить отдельно собственное газоотделение системы и откачиваемого объекта. Если собственное газовыделение системы составляет не более 20% от тех же значений для откачиваемого объекта, то их можно просуммировать, считая, что весь газ выделяется в откачиваемом объекте. В этом случае расчет распределения давления по длине вакуумной системы будет выполняться с запасом и можно рассматривать более простой случай вакуумной системы с сосредоточенными параметрами.

Общее газовыделение вакуумной системы в стационарном режиме работы складывается из собственного и технологического газовыделения:

$$Q = Q_c + Q_{тн} \quad (9.59)$$

Давление во входном сечении вакуумного насоса запишем согласно (9.14):

$$p_{нi} = p_{нi} + Q/S_{mi}, \quad (9.60)$$

где $p_{нi}$ и S_{mi} — предельное давление и номинальная быстрота откачки соответствующего насоса.

Повышение давления на последующих элементах i -го участка вакуумной системы можно определить по потоку Q и проводимости k -го элемента U_{ki} :

$$\Delta p_{ki} = Q/U_{ki}. \quad (9.61)$$

В местах, где имеются сужения трубопроводов, наблюдаются скачки давления

$$\Delta p_j = Q/U_{0j}, \quad (9.62)$$

где U_{0j} — проводимость j -го отверстия.

Давления в сечениях между элементами участка вакуумной системы можно рассчитать по формуле

$$p_{ik} = p_{нi} + Q/S_{mi} + Q/U_{ki}. \quad (9.63)$$

Предельное давление $p_{нi}$ может уменьшаться только на ловушке. Второе слагаемое в (9.63) постоянно, а третье только возрастает. На ловушке возможно как увеличение, так и снижение давления в зависимости от того, какое из слагаемых (9.63) вносит наиболее существенный вклад в изменение давления. При-

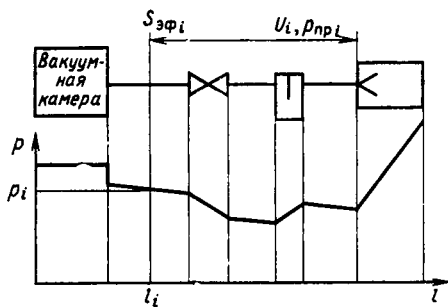


Рис. 9.27. Распределение давления в вакуумной системе

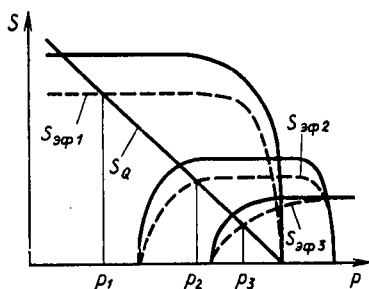


Рис. 9.28. * Графическая проверка выбора вакуумных насосов

мерный график распределения давления между насосом и откачиваемым объектом показан на рис. 9.27.

Полученные расчетные точки соединены прямыми линиями, что соответствует реальному распределению давлений в молекулярном режиме течения газа. В других режимах такой график можно рассматривать как упрощенный. Для точного описания распределения давления между граничными элементами вакуумной системы в вязкостном режиме нужно воспользоваться формулой (9.10).

Распределение давления удобно строить отдельно для собственного газовыделения установки и общего газовыделения. Первое является характеристикой самой установки, а второе — характеристикой осуществляемого в ней технологического процесса.

Графическая проверка выбора вакуумных насосов позволяет определить их рабочие давления. По графическим характеристикам насосов строятся их эффективные быстроты откачки. Для первого насоса в откачиваемом объекте, для второго — на выходе первого насоса и т. д. в соответствии с формулами (9.49) и (9.50). Пересечение этих кривых с кривой быстроты натекания $S=Q/p$ определяет рабочие давления всех насосов (рис. 9.28).

Проверка возможности запуска установки осуществляется графически по рис. 9.28. Запуск установки возможен, если при всех давлениях выше рабочего в откачиваемом объекте быстрота натекания меньше, чем эффективная быстрота откачки насосов.

Совместная работа последовательно или параллельно включенных насосов обеспечивается, если давление в их выходных патрубках ниже максимальных выпускных давлений этих насосов.

Методика определения области совместной работы насосов по потокам или рабочим давлениям описана в § 9.3. Возможна полная и частичная совместность их работы. В вакуумных системах

с устойчивым газовыделением можно ограничиться частичной совместностью работы насосов. В вакуумных системах с переменным газовыделением, например в вакуумной металлургии, необходимо обеспечивать полную совместность работы насосов.

По данным § 9.5 можно рассчитать себестоимость работы установки в течение часа $C_{\text{ч}} = CS_{\text{эф}}$, а в течение года при двухсменной работе $C_{\text{г}} = 4000CS_{\text{эф}}$.

§ 9.8. Пример проверочного расчета вакуумной системы в стационарном режиме работы

Для проверочного расчета выберем простейшую вакуумную систему, показанную на рис. 9.29, а. Откачиваемый объект и трубопровод изготовлены из нержавеющей стали. Вакуумная система находится в атмосфере азота при давлении 10^5 Па и температуре 300 К. Проверка на герметичность осуществляется галогенным течеискателем с атмосферным преобразователем. Число одновременно проверяемых соединений $m = 1$. Технологическое газовыделение отсутствует.

Определение собственного газовыделения. По формуле (9.51) и табл. 9.1 находим удельную газопроницаемость $q_{\text{п}}$, а по (9.52) — среднее газовыделение $q_{\text{ср}}$. Суммарная поверхность откачиваемого объекта и трубопровода, изображенных на рис. 9.29, а, может быть рассчитана по формуле

$$F = \sum_{i=1}^4 F_i = 4,7D^2 + 2,4D_{\text{в}}^2,$$

где D и $D_{\text{в}}$ — в метрах.

Газопроницаемость и диффузионное газовыделение конструкционных материалов для всей установки ($\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$)

$$Q_{\text{д}} + Q_{\text{п}} = (q_{\text{п}} + q_{\text{ср}}) F = (q_{\text{п}} + q_{\text{ср}}) (4,7D^2 + 2,4D_{\text{в}}^2).$$

По указанному типу течеискателя из табл. 9.3 находим минимальный поток, регистрируемый течеискателем: $Q_{\text{ти}} = 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Всего проверяемых соединений десять (два в трубопроводе и восемь в камере). Число испытаний на герметичность равно числу соединений ($m = 1$). По формуле (9.53) получим $Q_{\text{н}} = 0,2 \cdot 10 Q_{\text{ти}} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Собственное газовыделение установки $Q_{\text{с}} = Q_{\text{д}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{н}} = (q_{\text{п}} + q_{\text{ср}}) (4,7D^2 + 2,44D_{\text{в}}^2) + 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Для $q_{\text{п}} + q_{\text{ср}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $D = 1 \text{ м}$, $D_{\text{в}} = 0,5 \text{ м}$ получим $Q_{\text{с}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

Расчет распределения давления. В схеме рис. 9.29, а расчет проведем для двух сечений вакуумной системы: одно — между откачиваемым объектом и трубопроводом, второе — между насосом и трубопроводом. Давление в сечении между насосом и откачиваемым

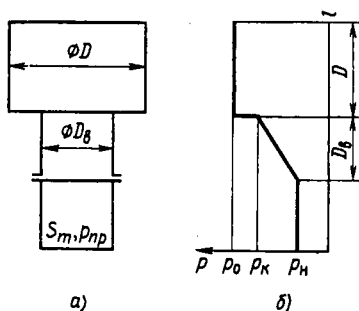


Рис. 9.29. Проверочный расчет: вакуумной системы в стационарном режиме работы:
 а — вакуумная схема; б — распределение давления по длине трубопровода

мым объектом вакуумной системы с сосредоточенными параметрами рассчитываем по формуле (9.60): $p_n = p_{np} + Q_c/S_m$.

Проводимость трубопровода круглого поперечного сечения при молекулярном режиме течения $U_{тр} = 121D_b^2$. Согласно (9.61), давление на конце трубопровода

$$p_k = p_n + \Delta p_k = p_n + \frac{Q_c}{121D_b^2}.$$

Проводимость входного отверстия из откачиваемого объекта в трубопровод при молекулярном режиме

$$U_{от}^- = \frac{91D_n^2}{1 - D_b^2/D^2}.$$

С учетом (9.62) запишем выражение для давления в откачиваемом объекте:

$$\begin{aligned} p_0 = p_k + \Delta p_j &= p_k + \frac{Q_c(1 - D_b^2/D^2)}{91D_b^2} \\ &= p_{np} + Q_c \left(\frac{1}{S_m} + \frac{1}{121D_b^2} + \frac{1 - D_b^2/D^2}{91D_b^2} \right). \end{aligned}$$

На рис. 9.29, б представлено распределение давления по длине трубопровода при $p_{np} = 10^{-5}$ Па, $S_m = 1$ м³/с. Давление в откачиваемом объекте $p_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ Па.

§ 9.9. Проектировочный расчет вакуумной системы в стационарном режиме работы

Проектировочный расчет выполняется при разработке новых вакуумных машин и установок. Целью такого расчета является выбор откачного оборудования, арматуры и определение размеров соединительных трубопроводов из условия обеспечения заданного рабочего давления в вакуумной камере. Основные технологические процессы в вакуумной камере осуществляются в стационарном режиме работы вакуумной установки. Для этого режима течения газа характерно постоянное или медленно меняющееся технологическое газовыделение.

Минимальная стоимость вакуумной системы достигается выбором оптимального значения коэффициента использования вакуумного насоса.

В качестве исходных данных при проектировочном расчете должны быть заданы: 1) суммарное технологическое газовыделение и натекание Q ; 2) рабочее давление в вакуумной камере p ; 3) время работы в стационарном режиме t_c ; 4) размеры откачиваемого объекта: диаметр d , длина l ; 5) дополнительные условия.

Суммарное газовыделение и натекание задается ориентировочно по аналогии с существующими конструкциями. Рабочее давление в вакуумной камере полностью определяется требованиями технологического процесса.

Время работы системы в стационарном режиме зависит от длительности осуществления техпроцесса.

Дополнительные условия могут содержать эксплуатационные и конструкторские требования: совместности работы вакуумных насосов в заданном диапазоне изменения потоков или давлений; дублирования систем с целью повышения надежности; регулировки давления в откачиваемом объекте; применения «двойной» откачки и т. д.

Проектировочный расчет вакуумной установки в стационарном режиме предусматривает следующие основные этапы: а) выбор вакуумной схемы; б) выбор вакуумных насосов; в) определение конструктивных размеров трубопроводов и выбор элементов вакуумной системы.

Вакуумную схему выбирают по аналогии с существующими установками такого же назначения.

При выборе типа вакуумного насоса могут быть учтены особенности осуществляемого технологического процесса, например ртутные выпрямители удобно откачивать паротутными насосами, оборудование для пропитки катушек трансформаторов — паромасляными насосами, установки для изучения свойств материалов при низких температурах — криосорбционными насосами, установки с собственными магнитными полями — магниторазрядными и т. д.

Условием стационарного режима работы вакуумной установки является равенство эффективной быстроты откачки $S_{эф}$ и быстроты газовыделения S_Q внутри вакуумной камеры: $S_{эф} = S_Q$.

Быстроту газовыделения можно определить по формуле $S_Q = Q/p$. Таким образом, в стационарном режиме работы для нахождения эффективной быстроты откачки насоса в вакуумной камере можно воспользоваться формулой

$$S_{эф} = Q/p. \quad (9.64)$$

По найденному значению $S_{эф}$, вакуумной схеме и типу насоса по методике, изложенной в § 9.5, можно найти оптимальное значение коэффициента использования $K_{ил}$ вакуумного насоса, непосредственно откачивающего вакуумную камеру.

Номинальное значение быстроты откачки насоса, откачивающего вакуумную камеру в стационарном режиме, можно определить по формуле (9.47), которая с учетом обозначений, принятых в исходных данных, примет следующий вид:

$$S_{mi} = \frac{Q}{K_{ni}p - p_{пр1}}, \quad (9.65)$$

где Q и p известны из исходных данных; K_{ni} определено; $p_{пр1}$ — характеристика выбранного типа насоса. Выбор типа насоса определяется условием $p_{пр1} \ll K_{ni}p$. Если это условие не выполняется, то необходимо выбрать насос другого типа с меньшим предельным давлением. По каталогу выбирают вакуумный насос, имеющий номинальную быстроту действия, большую или равную значению, определяемому по формуле (9.65).

Если не удается подобрать насос с необходимой быстротой действия, то можно применить параллельное включение насосов, при котором в соответствии с § 9.3 эффективные быстроты откачки всех насосов суммируются в откачиваемом объекте.

Аналогично можно выбрать все последовательно включенные насосы. При этом в качестве рабочего давления i -го насоса p_i для насосов, сжимающих газ, нужно принимать максимальное выпускное давление предыдущего насоса, а для сорбционных насосов — их наибольшее рабочее давление $p_{в(i-1)}$

$$p_i = p_{в(i-1)} / \eta,$$

где η — коэффициент запаса; $\eta = 2$.

Производительность откачки Q для всех последовательно включенных насосов остается неизменной, $p_{прi}$ и K_{ni} находят из каталогов, графиков или таблиц. Любой последовательно включенный насос, работающий при стационарном режиме, можно выбрать аналогично (9.65):

$$S_{mi} = \frac{Q}{K_{ni}p_i - p_{прi}}. \quad (9.66)$$

Для определения общей проводимости участка вакуумной системы от насоса до откачиваемого объекта или между двумя последовательно соединенными вакуумными насосами воспользуемся основным уравнением вакуумной техники, записав его в следующем виде:

$$U_{oi} = S_{mi} \frac{K_{ni}}{1 - K_{ni}}, \quad (9.67)$$

где U_{oi} — проводимость участка вакуумной системы от i -го насоса до предыдущего насоса или откачиваемого объекта.

Проводимость участка вакуумной системы может быть выражена через проводимости отдельных элементов — клапанов, ловушек, трубопроводов — с учетом их последовательного или параллельного

соединения. Если на участке вакуумной системы имеется несколько последовательно соединенных элементов, число которых равно m , то должно выполняться условие

$$\frac{1}{U_{0i}} = \frac{1}{U_{1i}} + \frac{1}{U_{2i}} + \dots + \frac{1}{U_{ji}} + \dots + \frac{1}{U_{mi}}. \quad (9.68)$$

При проектировании вакуумных систем нужно стремиться к тому, чтобы проводимости всех элементов вакуумной системы были одинаковы: $U_{1i} = U_{2i} = \dots = U_{ji} = \dots = U_{mi}$. Из (9.68) следует, что $U_{ji} = mU_{0i}$. Проводимость любого из элементов участка вакуумной системы должна быть в m раз больше, чем проводимость самого участка.

Сложные элементы — ловушки, клапаны, затворы — выбирают по каталогам (табл. 9.11). В случае отсутствия необходимого элемента возникает задача проектирования специального элемента. Составляется расчетная эквивалентная схема, при этом сложный элемент разбивается на более простые соединенные последовательно или параллельно расчетные элементы.

Таблица 9.11

Проводимость вакуумной запорной арматуры
в молекулярном режиме течения газа

Типы запорной арматуры	Диаметры условного прохода, мм	Проводимость, м ³ /с	Типы запорной арматуры	Диаметры условного прохода, мм	Проводимость, м ³ /с
ЗВЭ-100	100	1,2	ВРП-63	63	0,102
ЗВЭ-160	160	3,34	ВРП-100	100	0,332
ЗВЭ-250	250	13,4	КМУ1-10	10	0,0014
ЗВЭ-400	400	46,25	КМУ1-16	16	0,0040
ВЭП-25	25	0,014	КМУ1-25	25	0,0140
ВЭП-63	63	0,148	КМУ1-40	40	0,0400
ВЭП-100	100	0,470	КМУ1-63	63	0,1480
ВРП-25	25	0,011			

В молекулярном режиме течения вероятность прохождения элемента молекулами газа

$$P_i = \frac{U_i}{U_{от}} = \frac{U_i}{9l_0 d_0^2}, \quad (9.69)$$

где U_i — проводимость элемента; $U_{от}$ — проводимость входного отверстия; d_0 — диаметр входного отверстия. Вероятность P_i всегда может быть представлена в виде функции, зависящей только от отношения размеров элемента,

$$P_i \left(\frac{d_1}{l_1}, \frac{d_2}{l_2}, \dots, \frac{d_1^2}{d_0^2}, \frac{d_2^2}{d_0^2}, \dots \right),$$

значение которой остается постоянным при подобном изменении размеров элемента. Задавшись принципиальной схемой элемента, можно определить все относительные размеры, а следовательно, и значение функции P_i . Так как значение U_i известно, то из (9.69) можно найти диаметр входного отверстия d_0 и все остальные размеры элемента.

Пользуясь компоновочной вакуумной схемой, определяют длины всех трубопроводов. Режим течения газа можно определить по диаметру входного патрубка насоса и заданному рабочему давлению. Пользуясь приведенными ранее формулами для расчета проводимостей трубопроводов при различных режимах течения, по известной проводимости и длине трубопровода всегда можно определить его диаметр.

Рекомендуется выбирать следующие номинальные размеры условных проходов элементов вакуумных систем (мм): 0,1; 0,25; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2500; 4000; 6300.

Для использования в фланцевых, штуцерных соединениях и элементах трубопроводов допускается применение следующим номинальных размеров условных проходов (мм): 8; 12; 20; 32; 50; 80; 125; 200; 320; 500; 800; 1250; 2000; 3150; 5000 (ГОСТ 18626—73).

§ 9.10. Пример проектировочного расчета вакуумной системы в стационарном режиме работы

Выберем для проектировочного расчета вакуумную систему установки, обеспечивающую возможность получения сверхвысокого вакуума.

Исходные данные: 1) суммарная производительность газовойделения и натекания $Q=4 \cdot 10^{-6}$ м³·Па/с; 2) рабочее давление в вакуумной камере $p=10^{-5}$ Па; 3) время работы системы в стационарном режиме $t_c=3600$ с; 4) размеры откачиваемого объекта: $d=500$, $l=1000$ мм; 5) дополнительные условия — использование магнито-разрядного, пароструйного и вращательного насосов.

1. *Выбор вакуумной схемы.* Выбираем вакуумную схему, изображенную на рис. 9.23.

2. *Выбор вакуумных насосов.*

а. *Выбор сверхвысоковакуумного насоса.* В соответствии с дополнительным условием для сверхвысоковакуумной откачки выбираем магнито-разрядные насосы серии НМД с предельным давлением $p_{прз}=7 \cdot 10^{-8}$ Па и диапазоном быстрот действия от $6 \cdot 10^{-3}$ до $1,2$ м³/с.

Эффективную быстроту откачки в откачиваемом объекте определяем по (9.64):

$$S_{эф1} = Q/p_1 = 5 \cdot 10^{-6} / 10^{-5} = 5 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Найдем коэффициент использования магнитоэразрядного насоса. Пользуясь методикой, изложенной в § 9.5, или рис. 9.25, при $n=3$ находим для $S_{эф} = 10^{-1}$ м³/с оптимальное значение коэффициента использования $K_{н1} = 0,35$.

Воспользуемся формулой (9.65) для нахождения номинальной быстроты действия:

$$S_{m1} = \frac{Q}{K_{н1} p_1 - p_{пр1}} =$$

$$= \frac{4 \cdot 10^{-6}}{0,35 \cdot 10^{-5} - 7 \cdot 10^{-6}} = 1,17 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Ближайший по скорости действия магнитоэразрядный насос НМДО-1 имеет следующие характеристики:

Номинальная быстрота действия, м ³ /с	1,20
Диаметр входного патрубка, мм	250
Наибольшее рабочее давление, Па	10 ⁻¹
Наибольшее давление запуска, Па	10 ⁰
Предельное давление, Па	7,0 · 10 ⁻⁸

Зависимость быстроты действия насоса НМДО-1 от давления на входе в насос приведена на рис. 9.30.

б. *Выбор высоковакуумного насоса.* В соответствии с дополнительными условиями выбираем серию паромасляных насосов типа Н, имеющих предельное давление $p_{пр2} = 3 \cdot 10^{-4} \dots 4 \cdot 10^{-5}$ Па с диапазоном быстрот действия от $1,5 \cdot 10^{-2}$ до 30 м³/с.

Рабочее давление парамасляного насоса выбираем по наибольшему рабочему давлению магнитоэразрядного насоса с коэффициентом запаса $\varphi = 2$. Тогда $p_2 = 10^{-1}/\varphi = 5 \cdot 10^{-2}$ Па, что соответствует эффективной скорости откачки $S_{эф2} = Q/p_2 = 4 \cdot 10^{-6}/(5 \cdot 10^{-2}) = 8 \cdot 10^{-5}$ м³/с.

По методике, изложенной в § 9.5, или по рис. 9.22 при $n=5$ находим при $S_{эф} = 8 \cdot 10^{-5}$ м³/с оптимальное значение коэффициента использования $K_{н2} = 0,13$. Номинальная быстрота действия пароструйного насоса

$$S_{m2} = \frac{Q}{K_{н2} p_2 - p_{пр2}} = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{0,13 \cdot 5 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-4}} = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Ближайший по скорости действия пароструйный насос Н-0,15С серии Н имеет следующие характеристики:

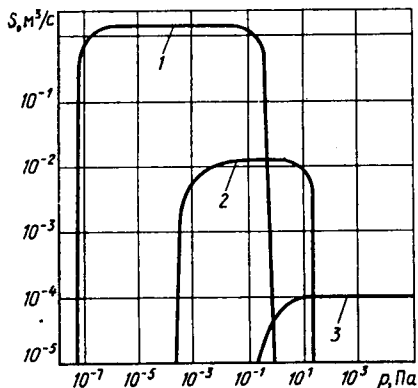


Рис. 9.30. Быстрота действия вакуумных насосов:

1 — НМДО-1; 2 — Н-0,15С; 3 — ВН-01 при различных давлениях на входе в насос

Номинальная быстрота действия, м ³ /с	1,5·10 ⁻²
Диаметр входного патрубка, мм	46
Диаметр выпускного патрубка, мм	8
Наибольшее выпускное давление, Па	53
Предельное давление, Па	3·10 ⁻⁴
Предельное давление насоса с ловушкой, Па	3·10 ⁻⁵

Зависимость быстроты действия насоса Н-0,15С от давления на входе приведена на рис. 9.30.

в. *Выбор насоса для работы в области среднего и низкого вакуума.* В соответствии с дополнительным условием выбираем серию вращательных насосов типа ВН с предельным давлением по воздуху (с ловушкой) $4 \cdot 10^{-1} \dots 10^{-2}$ Па и диапазоном быстрот действия от 10^{-4} до $1,5 \cdot 10^{-1}$ м³/с.

Рабочее давление механического насоса выбираем по максимальному выпускному давлению паромасляного насоса с коэффициентом запаса $\varphi = 2$. Тогда $p_3 = 53/\varphi = 27$ Па, что соответствует эффективной скорости откачки

$$S_{эфз} = \frac{Q}{p_3} = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{27} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}.$$

По методике, изложенной в § 9.5, или по рис. 9.17 найдем при $S_{эфз} = 1,5 \cdot 10^{-7}$ м³/с и $n = 3$ оптимальное значение $K_{из} = 0,7$.

Номинальная быстрота действия механического насоса

$$S_{мз} = \frac{Q}{K_{из} p_3 - p_{прз}} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{0,7 \cdot 27 - 4 \cdot 10^{-1}} = 2,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Ближайший по скорости действия механический насос ВН-01 имеет следующие характеристики:

Номинальная быстрота действия, м ³ /с	10 ⁻⁴
Диаметр входного патрубка, мм	8
Предельное давление, Па	4
Предельное давление насоса с ловушкой, Па	4·10 ⁻¹
Максимальное выпускное давление, Па	10 ⁵

Зависимость быстроты действия насоса ВН-01 от давления на входе приведена на рис. 9.30.

3. *Определение конструктивных размеров трубопроводов и выбор элементов вакуумной системы*

а. *Сверхвысоковакуумная система.* Найдем общую проводимость участка вакуумной системы от магниторазрядного насоса до вакуумной камеры по формуле (9.67):

$$U_{02} = S_{н1} \frac{K_{н1}}{1 - K_{н1}} = 1,2 \frac{0,35}{1 - 0,35} = 0,65 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $S_{н1}$ — быстрота действия насоса, выбранного по каталогу.

Составим компоновочную схему рассматриваемого участка вакуумной системы.

На рис. 9.31 показаны внутренние размеры откачиваемого объекта и длины трубопроводов. Участок вакуумной системы состоит из трех элементов: трубопроводов 1 и 2 и затвора 3.

Определим проводимости элементов и диаметры трубопроводов. Будем считать в первом приближении, что все элементы имеют одинаковую проводимость. Тогда $U_{ij} = 3U_{01} = 3 \cdot 0,65 \approx 2 \text{ м}^3/\text{с}$. Режим течения газа в трубопроводе определим по рабочему давлению $p_1 = 10^{-5} \text{ Па}$ и диаметру входного патрубка насоса $d_{\text{вх}} = 0,25 \text{ м}$. Критерий Кнудсена

$$Kn = \frac{L}{d_{\text{эф}}} = \frac{L_1}{p_1 d_{\text{вх}}} = \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{10^{-5} \cdot 0,25} = 3 \cdot 10^3 > 1,5,$$

т. е. режим течения молекулярный.

Диаметр первого элемента может быть рассчитан из условия последовательного соединения входного отверстия и трубопровода:

$$\frac{1}{U_{11}} = \frac{1 - d_1^2/0,5^2}{91d_1^2} + \frac{0,2}{121d_1^3} = \frac{1}{2}.$$

Отсюда получаем $d_1 = 0,19 \text{ м}$. По ГОСТ 18626—73 выбираем условный проход трубопровода $d_1 = 0,2 \text{ м}$. Тогда проводимость первого участка $U_{11} = 2,29 \text{ м}^3/\text{с}$, проводимость отверстия $3,7 \text{ м}^3/\text{с}$, проводимость трубопровода $4,84 \text{ м}^3/\text{с}$.

В качестве затвора выбираем ЗВЭ с диаметром условного прохода $d = 160 \text{ мм}$ (см. табл. 9.11) и проводимостью в молекулярном режиме течения газа $3,34 \text{ м}^3/\text{с}$. С учетом входного сопротивления проводимость затвора найдем из равенства

$$\frac{1}{U_{12}} = \frac{1 - d_y^2/d_1^2}{91d_y^2} + \frac{1}{3,34}.$$

Таким образом, $U_{12} = 2,2 \text{ м}^3/\text{с}$, причем проводимость входного отверстия $6,4 \text{ м}^3/\text{с}$, а проводимость затвора $3,34 \text{ м}^3/\text{с}$.

Диаметр трубопровода на третьем участке выберем из условия $U_{13} = 2 \text{ м}^3/\text{с}$. Тогда с учетом размеров предыдущего элемента

$$\frac{1}{U_{13}} = \frac{1 - d_3^2/d_2^2}{91d_3^2} + \frac{0,2}{121d_3^3} = \frac{1}{2}.$$

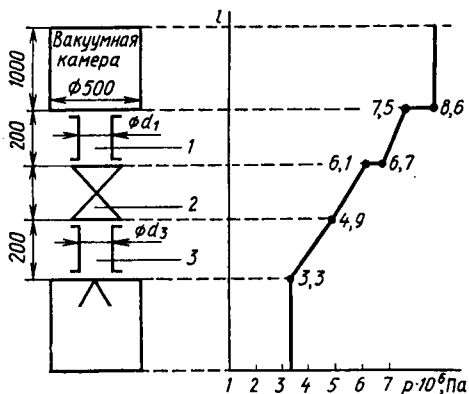


Рис. 9.31. Схема сверхвысоковакуумного участка:

1, 3 — трубопроводы; 2 — затвор

При $d_2=0,16$ м из записанного соотношения имеем $d_3=0,153$ м. Согласно рекомендуемому ряду диаметров выбираем $d_3=0,160$ м.

Таким образом, $U_{13}=2,48$ м³/с, а общая проводимость участка с учетом того, что входная проводимость насоса равна бесконечности,

$$\frac{1}{U_{с1}} = \frac{1}{U_{11}} + \frac{1}{U_{12}} + \frac{1}{U_{13}} = \frac{1}{2,29} + \frac{1}{2,2} + \frac{1}{2,48} = \frac{1}{0,78}.$$

Общая проводимость выбранного участка вакуумной системы 0,78 м³/с, что несколько больше требуемой 0,65 м³/с. Коэффициент использования магниторазрядного насоса

$$K_{н1} = \frac{U_{01}}{S_{н1} + U_{01}} = \frac{0,88}{1,20 + 0,78} = 0,39.$$

Коэффициент использования $K_{н1}=0,39$ близок к оптимальному значению 0,35.

Рассчитаем распределение давления по длине участка вакуумной системы от магниторазрядного насоса до откачиваемого объекта. Результаты расчета занесены в табл. 9.12.

Т а б л и ц а 9.12

Распределение давления на участке вакуумной системы от магниторазрядного насоса до откачиваемого объекта

Название элементов	Проводимость элемента U , м ³ /с	Перепад давления на элементах Δp , Па	Давление на входе в элементы, Па	Давление на выходе из элементов, Па	
Элемент 3	2,48	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	
Затвор ЗВЭ	по длине	3,34	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$
	входное отверстие	6,41	$0,6 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$
Элемент 1	трубопровод	4,84	$8,3 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$
	входное отверстие	3,7	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$

Давление во входном сечении насоса, согласно (9.60),

$$p_{н1} = p_{пр1} + \frac{Q}{S_{м1}} = 7 \cdot 10^{-8} + \frac{4 \cdot 10^{-6}}{1,2} = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па.}$$

Перепад давления на элементе 3 $\Delta p_3 = Q/U_{13} = 4 \cdot 10^{-6}/2,48 = 1,6 \cdot 10^{-6}$ Па. Аналогично находим перепады давлений на остальных элементах, рассчитываем давления на входе и выходе каждого элемента и по полученным результатам строим график распределения давления на рис. 9.31.

б. *Высоковакуумная система.* Найдем общую проводимость участка вакуумной системы от пароструйного насоса до вакуумной камеры по (9.67):

$$U_{02} = S_{m2} \frac{K_{и2}}{1 - K_{и2}} = 1,5 \cdot 10^{-2} \times \frac{0,13}{1 - 0,13} = 2,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с},$$

где S_{m2} — быстрота действия пароструйного насоса, выбранного по каталогу.

Составим компоновочную схему рассматриваемого участка вакуумной системы. На компоновочной схеме (рис. 9.32) показаны внутренние размеры откачиваемого объекта и трубопроводов. Участок вакуумной системы состоит из пяти элементов: трубопроводов 1, 3, 5, затвора 2 и ловушки 4.

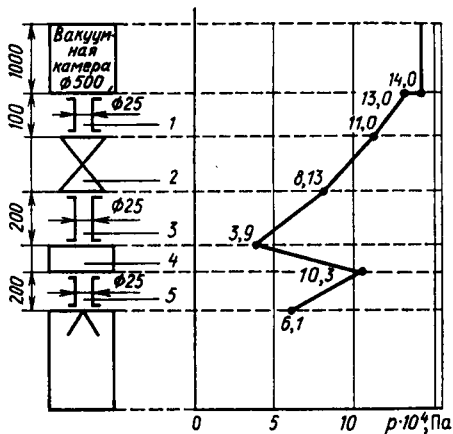


Рис. 9.32. Схема высоковакуумного участка:

1, 3, 5 — трубопроводы; 2 — затвор; 4 — ловушка

Таблица 9.13

Распределение давления на участке вакуумной системы от пароструйного насоса до откачиваемого объекта

Название элементов	Проводимость элемента U , $\text{м}^3/\text{с}$	Предельное давление $P_{пр}$, Па	Перепад давления на элементах Δp , Па	Давление на входе в элемент, Па	Давление на выходе из элементов, Па
Трубопровод № 5	$9,45 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4,23 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$
Ловушка № 4	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3,57 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$
Трубопровод № 3	$9,45 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$4,23 \cdot 10^{-4}$	$8,13 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$
Клапан № 2	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$8,13 \cdot 10^{-4}$
Трубопровод № 1:					
трубопровод	$1,89 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
входное отверстие	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$

Определим проводимости элементов и диаметров трубопроводов. Предположим, что все элементы имеют одинаковую проводимость.

Тогда $U_{2j} = 5U_{02} = 5 \cdot 2,24 \cdot 10^{-3} = 1,12 \cdot 10^{-2}$ м³/с. Режим течения газа в трубопроводе определим по рабочему давлению $p_2 = 5 \cdot 10^{-2}$ Па и диаметру входного патрубка насоса $d_{вх} = 0,046$ м. Критерий Кнудсена

$$K_{п} = \frac{L}{d_{эф}} = \frac{L_1}{p_2 d_{вх}} = \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,046} = 3,26 > 1,5,$$

т. е. режим течения молекулярный.

Диаметр элемента l может быть рассчитан из условия последовательного соединения входного отверстия и трубопровода

$$\frac{1}{U_{21}} = \frac{1 - d_1^2/0,5^2}{91d_1^2} + \frac{0,1}{121d_1^3} = \frac{1}{1,12 \cdot 10^{-2}}.$$

Из записанного уравнения находим $d_1 = 0,023$ м. По ГОСТ 18626—73 выбираем условный проход трубопровода $d_1 = 0,025$ м. Тогда проводимость первого участка $U_{21} = 1,42 \cdot 10^{-2}$ м³/с, проводимость отверстия $5,7 \cdot 10^{-2}$ м³/с, проводимость трубопровода $1,89 \times 10^{-2}$ м³/с. В качестве клапана выбираем ВЭП-25 по табл. 9.11. с диаметром условного прохода $d_y = 25$ мм и проводимостью в молекулярном режиме течения газа $0,014$ м³/с.

Таким образом, $U_{22} = 0,014$ м³/с, причем проводимость входного отверстия равна бесконечности.

Диаметр трубопровода на третьем участке выберем из условия $U_{23} = 1,12 \cdot 10^{-2}$ м³/с, тогда с учетом размеров предыдущего элемента

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{U_{23} \cdot 0,2}{121}} = \sqrt[3]{\frac{1,12 \cdot 10^{-2} \cdot 0,2}{121}} = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Выбираем $d_3 = 0,025$ м, тогда $U_{23} = 9,45 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Выбираем ловушку, имеющую $d_y = 25$ мм и проводимость $U_{24} = 1,12 \cdot 10^{-2}$ м³/с.

Пятый участок по размерам совпадает с третьим участком, т. е. $U_{25} = 9,45 \cdot 10^{-3}$ м³/с, $d_5 = 25$ мм. Входная проводимость насоса равна бесконечности. Общая проводимость находится из следующего выражения:

$$\begin{aligned} \frac{1}{U_{02}} &= \frac{1}{U_{21}} + \frac{1}{U_{22}} + \frac{1}{U_{23}} + \frac{1}{U_{24}} + \frac{1}{U_{25}} = \frac{1}{1,42 \cdot 10^{-2}} + \\ &+ \frac{1}{1,4 \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{9,45 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{1,12 \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{9,45 \cdot 10^{-3}} = 442,8 \text{ с/м}^3; \\ U_{02} &= 2,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с.} \end{aligned}$$

Общая проводимость выбранного участка вакуумной системы $2,26 \cdot 10^{-3}$ м³/с, что несколько больше требуемой $2,24 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Коэффициент использования пароструйного насоса в системе

$$K_{н2} = \frac{U_{02}}{S_{н2} + U_{02}} = \frac{2,26 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-2} + 2,26 \cdot 10^{-3}} = 0,13.$$

Коэффициент использования $K_{и2}=0,13$ равен оптимальному значению.

Рассчитаем распределение давления по длине участка вакуумной системы от пароструйного насоса до откачиваемого объекта.

Давление во входном сечении насоса, согласно (9.60),

$$p_{и2} = p_{пр2} + \frac{Q}{S_{m2}} = 3 \cdot 10^{-4} + \frac{4 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-2}} = 3 \cdot 10^{-4} + 3,07 \cdot 10^{-4} = 6,1 \cdot 10^{-4} \text{ Па.}$$

Перепад давления на элементе 5

$$\Delta p_5 = \frac{Q}{U_{25}} = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{9,45 \cdot 10^{-3}} = 4,23 \cdot 10^{-4} \text{ Па.}$$

Аналогично находим перепады давлений на остальных элементах, рассчитывая давления на входе и выходе каждого. Полученные результаты заносим в табл. 9.13 и строим график распределения давлений (рис. 9.32).

в. Низковакуумная система. Найдем общую проводимость участка вакуумной системы от пароструйного насоса до механического по (9.67):

$$U_{03} = S_{m3} \frac{K_{и3}}{1 - K_{и3}} = 10^{-4} \frac{0,7}{1 - 0,7} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с},$$

где S_{m3} — быстрота действия механического насоса, выбранного по каталогу.

Составим компоновочную схему рассматриваемого участка вакуумной системы. На компоновочной схеме (рис. 9.33) показаны длины трубопроводов и диаметр выпускного патрубка пароструйного насоса 8 мм, диаметр входного патрубка механического насоса 8 мм. Участок вакуумной системы состоит из семи элементов: четырех трубопроводов 1, 3, 5, 7, клапанов 2, 6 и ловушки 4.

Определим проводимость элементов и диаметров трубопроводов. Предположим, что все элементы имеют одинаковую проводимость, тогда

$$U_{3j} = 7U_{03} = 7 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Режим течения газа в трубопроводе определим по рабочему давлению

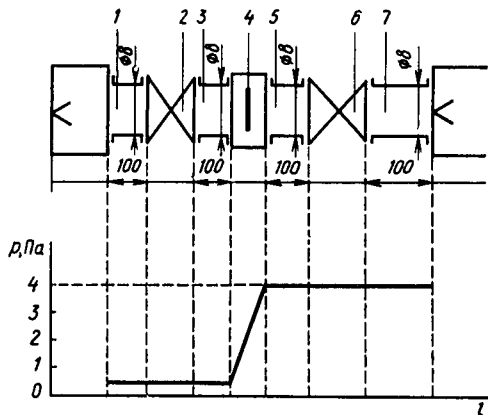


Рис. 9.33. Схема низковакуумного участка:
1, 3, 5, 7 — трубопроводы; 2, 6 — клапаны; 4 — ловушка

лению $p_3 = 27$ Па и диаметру входного патрубка механического насоса $d_{вх} = 0,008$ м. Критерий Кнудсена

$$Kn = \frac{L}{d_{эф}} = \frac{L_1}{p_3 d_{вх}} = \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{27 \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 0,035 < 1, 5,$$

но $0,035 > 5 \cdot 10^{-3}$, т. е. режим течения молекулярно-вязкостный.

Сопротивлением отверстий при небольшом перепаде давления, характерном для установившегося режима при $K_{из} = 0,7$, в молекулярно-вязкостном режиме можно пренебречь.

Диаметр первого трубопровода можно рассчитать при среднем давлении в трубопроводе $p_{ср} = p_3 = 27$ Па по проводимости

$$U_{31} = 121 \frac{d_{13}^3}{l_{13}} 0,9 + 1,35 \cdot 10^3 \frac{d_{13}^4}{l_{13}} p_{ср},$$

откуда $d_{13}^4 + 3 \cdot 10^{-3} d_{13}^3 - 4,4 \cdot 10^{-9} = 0$. Имеем $d_{13} = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м.

По ГОСТ 18626—73 выбираем $d_{13} = 8 \cdot 10^{-3}$ м, что соответствует $U_{31} = 2,1 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Тогда получим $d_{33} = d_{53} = d_{73} = 8 \cdot 10^{-3}$ м.

В качестве клапанов на втором и шестом участках по табл. 9.11 выбираем КМУ1-10 с диаметром условного прохода $d_y = 10$ мм и проводимостью $0,0014$ м³/с. Проводимость клапана в молекулярно-вязкостном режиме несколько больше, чем в молекулярном. Разницей проводимостей в данном расчете пренебрегаем.

Выбираем ловушку, имеющую $d_y = 10$ мм и проводимость $U_{34} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Общую проводимость находим из следующего выражения:

$$\frac{1}{U_{03}} = \sum_{i=1}^7 \frac{1}{U_{3i}},$$

откуда $U_{03} = 2,53 \cdot 10^{-4}$ м³/с.

Общая проводимость выбранного участка вакуумной системы $2,53 \cdot 10^{-4}$ м³/с, что несколько больше требуемой $2,3 \cdot 10^{-4}$ м³/с.

Коэффициент использования механического насоса в системе

$$K_{из} = \frac{U_{03}}{S_{м3} + U_{03}} = \frac{2,53 \cdot 10^{-4}}{10^{-4} + 2,53 \cdot 10^{-4}} = 0,72.$$

Коэффициент $K_{из} = 0,72$ близок к оптимальному значению $0,7$.

Рассчитаем распределение давления по длине участка вакуумной системы от механического до пароструйного насоса. Давление во входном сечении насоса, согласно (9.60),

$$p_{из} = p_{пр3} + \frac{Q}{S_{м3}} = 4 + \frac{4 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-4}} = 4 \text{ Па.}$$

Перепад давления на элементе 7

$$\Delta p_7 = Q/U_{37} = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{2,1 \cdot 10^{-3}} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ Па.}$$

Аналогично находим перепады давлений на остальных элементах, рассчитывая давления на входе и выходе каждого. Полученные результаты заносим в табл. 9.14 и строим график распределения давлений (рис. 9.33). В элементах 1, 2, 3, 4 принимаем предельное давление механического насоса с ловушкой $4 \cdot 10^{-1}$ Па.

Таблица 9.14

Распределение давления на участке вакуумной системы от механического насоса до пароструйного

Название элементов	Проводимость элементов U , м ³ /с	Предельное давление $p_{пр}$, Па	Перепад давления на элементах Δp , Па	Давление на входе в элементах, Па	Давление на выходе из элементов, Па
Трубопровод № 7	$2,1 \cdot 10^{-3}$	4	$1,9 \cdot 10^{-3}$	4	4
Клапан № 6	$1,4 \cdot 10^{-3}$	4	$2,86 \cdot 10^{-3}$	4	4
Трубопровод № 5	$2,1 \cdot 10^{-3}$	4	$1,9 \cdot 10^{-3}$	4	4
Ловушка № 4	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,4	4
Трубопровод № 3	$2,1 \cdot 10^{-3}$	0,4	$1,9 \cdot 10^{-3}$	0,4	0,4
Клапан № 2	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,4	$2,86 \cdot 10^{-3}$	0,41	0,4
Трубопровод № 1	$2,1 \cdot 10^{-3}$	0,4	$1,9 \cdot 10^{-3}$	0,41	0,41

§ 9.11. Расчет централизованных вакуумных систем

В централизованных системах откачки одним насосом одновременно откачивается несколько объектов, подключенных к общему коллектору. Примером централизованной системы является подключение нескольких высоковакуумных насосов к одному форвакуумному насосу. Расчетная схема централизованной откачки показана на рис. 9.34. Вакуумный насос через трубопровод длиной l_1 проводимостью U_1 подключен к коллектору длиной l_k . Откачиваемые насосы с производительностями Q_1, \dots, Q_n соединены с коллектором через соединительные трубопроводы длиной L_1, \dots, L_n и характеризуются известными коэффициентами одновременности работы t и нестабильности рабочего давления g_1, \dots, g_n .

Для коллектора на участках между последовательно подключенными откачиваемыми насосами в установившемся режиме справедливы следующие уравнения газовых

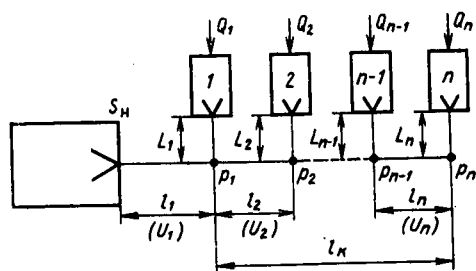


Рис. 9.34. Схема централизованной вакуумной системы

ПОТОКОВ:

$$\begin{aligned}
 m \sum_{i=2}^n Q_i g_i &= U_2(p_2 - p_1); \\
 m \sum_{i=3}^n Q_i g_i &= U_3(p_3 - p_2); \\
 &\dots \dots \dots \\
 m Q_n g_n &= U_n(p_n - p_{n-1}).
 \end{aligned}
 \tag{9.70}$$

Систему (9.70) можно переписать в другом виде:

$$\begin{aligned}
 p_2 &= p_1 + \frac{m}{U_2} \sum_{i=2}^n Q_i g_i, \\
 p_3 &= p_1 + m \left(\frac{1}{U_2} \sum_{i=2}^n Q_i g_i + \frac{1}{U_3} \sum_{i=3}^n Q_i g_i \right); \\
 &\dots \dots \dots \\
 p_n &= p_1 + m \left(\frac{1}{U_2} \sum_{i=2}^n Q_i g_i + \dots + \frac{Q_n g_n}{U_n} \right).
 \end{aligned}
 \tag{9.71}$$

При заданных размерах коллектора, определяющих проводимости U_2, \dots, U_n , потоках Q_2, \dots, Q_n и давлении в одной из точек подключения откачиваемых объектов (обычно p_n) из системы (9.71) могут быть определены давления во всех остальных сечениях коллектора, в том числе и давление p_1 .

Давление p_n при централизованной откачке насосов выбирают меньше максимального выпускного давления высоковакуумного насоса.

Быстрота действия насоса (номинальная)

$$S_m = \frac{Q_c}{K_n p_1 - p_{пр}},$$

где Q_c — суммарная производительность откачки $\left(Q_c = m \sum_{i=1}^m Q_i g_i \right)$;

K_n — коэффициент использования насоса; p_1 — давление в месте подключения первого откачиваемого объекта; $p_{пр}$ — предельное давление насоса.

Проводимость трубопровода l определяют по формуле $U_1 = K_n S_m / l - K_n$.

По найденному значению проводимости U_1 , длине трубопровода l_1 , предварительно определив режим течения газа, можно найти диаметр первого трубопровода d_1 .

Диаметры соединительных трубопроводов длиной L_1, \dots, L_n определяют из проводимостей по заданному перепаду давления между коллектором и откачиваемыми объектами $U'_i = Q_i / \Delta p_i$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков вид зависимости давления по длине трубопровода при вязкостном и молекулярном режимах течения?
2. В каких случаях целесообразно применять параллельное или последовательное соединение вакуумных насосов?
3. Как рассчитать эквивалентную проводимость параллельно или последовательно соединенных вакуумных трубопроводов?
4. Чем определяются условия полной совместности работы последовательно включенных вакуумных насосов?
5. Какие виды газовых нагрузок характерны для вакуумных систем, работающих в стационарном режиме?
6. Чем объяснить наличие оптимального коэффициента использования вакуумных насосов, работающих в стационарном режиме?
7. Чем отличаются типовые вакуумные системы для получения низкого, среднего и высокого вакуума?
8. В каких случаях применяются трех-, двух- и однотрубные централизованные системы?
9. Каковы исходные данные для проверочного расчета вакуумной системы?
10. Назовите этапы проектировочного расчета вакуумной системы.

ГЛАВА 10

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

§ 10.1. Условия квазистационарности

На начальной стадии удаления газа из вакуумной системы и при изменении условий работы всегда происходит изменение во времени давлений в различных частях вакуумной системы, т. е. существует нестационарный режим работы. При этом режиме понятием проводимости трубопровода, введенным при постоянной разности давлений на его концах, уже пользоваться нельзя и расчеты системы существенно усложняются.

В некоторых случаях нестационарный режим работы вакуумной системы может быть сведен к квазистационарному режиму, когда время установления равновесного давления в трубопроводе значительно меньше, чем в откачиваемом объекте. Изменение давления в трубопроводе происходит значительно быстрее, чем в откачиваемом объекте. В этом случае в каждый момент времени распределение давления в вакуумной системе можно рассчитывать так же, как в стационарном режиме.

Математически условие существования квазистационарного режима может быть записано через соотношение временных постоянных:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{VU}{V_{\text{тр}}S_{\text{эф}}} \gg 1, \quad (10.1)$$

где $\tau_1 = V/S_{\text{эф}}$; V — объем откачиваемого объекта; $S_{\text{эф}}$ — эффективная быстрота откачки объекта; $\tau_2 = V_{\text{тр}}/U$; $V_{\text{тр}}$ и U — объем и проводимость трубопровода.

В связи с тем что $S_{\text{эф}}$ всегда меньше U , условие (10.1) с запасом будет выполняться, если

$$V/V_{\text{тр}} \gg 1. \quad (10.2)$$

При выполнении условия (10.1) трубопровод можно рассматривать как часть откачиваемого объекта, объем которого равен $V + V_{\text{тр}}$.

Примером существования квазистационарного режима работы вакуумной системы с большим откачиваемым объектом является откачка объекта от атмосферного до рабочего давления. В этом случае давление в откачиваемом объекте является функцией времени, но в каждый момент времени газовый поток на входе и выходе из трубопровода практически не изменяется.

Таким образом, можно различать три режима работы вакуумной системы: стационарный, нестационарный и квазистационарный. Для *стационарного* режима характерна неизменность во времени давлений и потоков во всех сечениях вакуумной системы; выполняется условие сплошности потоков. *Нестационарный* режим характеризуется зависимостью давлений и потоков в различных сечениях вакуумной системы от времени откачки. *Квазистационарный режим* — это разновидность нестационарного режима, при котором выполняется условие (10.1).

Задачи, связанные с изучением течения газа по вакуумным трубопроводам в стационарном и нестационарном режимах работы, имеют только приближенную аналогию с задачами расчета электрических цепей с пассивными и активными элементами. Трудность электро моделирования вакуумных систем заключается в том, что сопротивление элементов вакуумных систем зависит от давления и формы предшествующего элемента.

§ 10.2. Расчет газовых нагрузок

Нестационарное газовыделение из конструкционных материалов состоит из следующих независимых компонентов: десорбционного и диффузионного газовыделения, газопроницаемости, натекания.

Десорбционное газовыделение связано с десорбцией газов и паров с внутрикамерных деталей, стенок камеры, трубопроводов и арматуры. Особенно нежелательными являются пары воды и масел,

адсорбируемые на внутренних поверхностях вакуумной камеры. Вода конденсируется на стенках во время напуска атмосферного воздуха при загрузке обрабатываемых изделий, источником паров масел могут являться вакуумные насосы.

Изотерма адсорбции паров воды на нержавеющей стали, полученная экспериментально, представлена на рис. 10.1. Количество адсорбированных паров воды при давлениях 665... 0,665 Па находится в пределах 0,152... 0,013 м³·Па/м². На этом же рисунке по оси ординат показано количество мономолекулярных слоев воды на поверхности стали, полученное из выражения

$$\theta = Na/a_1,$$

где $N = 2,45 \cdot 10^{20}$ — количество молекул газа в 1 м³ при давлении 1 Па и температуре 298 К; $a_1 = 4,9 \cdot 10^{18}$ 1/м² — количество молекул воды, необходимое для образования одного монослоя на поверхности 1 м².

Для аналитического описания изотермы адсорбции паров воды можно воспользоваться уравнением Фрейндлиха, записанном в виде

$$\lg a = \lg K + \frac{1}{n} \lg p, \quad (10.3)$$

где $K = 0,0185$ и $n = 2,9$ — константы, зависящие от природы адсорбента, адсорбируемого газа и температуры поверхности вакуумной камеры; p — давление паров воды в камере, Па.

Конструктивным способом уменьшения десорбционного газовыделения паров воды является использование шлюзовых загрузочных устройств, благодаря которым изделие попадает в вакуумную камеру без нарушения вакуума.

Диффузионное газовыделение сопровождается поглощением или выделением газа с поверхности деталей, расположенных внутри вакуумной камеры. Ограничим рассмотрение случаев, когда массообмен происходит только в поверхностном слое, толщина которого значительно меньше общей толщины деталей. При этом деталь можно рассматривать как полубесконечное тело. Длина детали должна быть существенно больше ее толщины, что позволяет считать задачу одномерной.

Предположим, что начальная концентрация газа в детали постоянна и равна s_0 . Давление газа над поверхностью детали также будем считать постоянным, а равновесную концентрацию газа

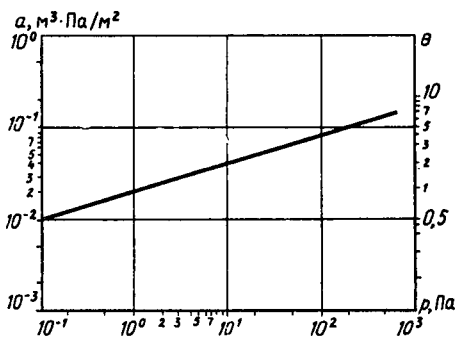


Рис. 10.1. Равновесная адсорбция паров воды на нержавеющей стали при комнатной температуре

в детали, соответствующую этому давлению, обозначим через s_m . Независимость s_0 и s_m от времени соответствует граничным условиям первого рода.

На практике такая задача часто встречается, когда обезгаживание деталей происходит при постоянных температуре и давлении, а коэффициент диффузии достаточно мал: $D < 0,1h^2/t_{\max}$, где h — половина толщины детали; t_{\max} — максимальная длительность процесса массообмена.

Математически данную задачу можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 s}{\partial x^2}; \\ t=0; \quad s(x, 0) &= s_0; \quad x=0; \quad s(0, t) = s_m; \\ t=\infty; \quad s(x, \infty) &= s_m; \quad x=\infty; \quad \frac{\partial s(\infty, t)}{\partial t} = 0. \end{aligned} \quad (10.4)$$

Решение (10.4) при указанных граничных условиях можно представить в виде функции безразмерного времени $\tau = Dt/h^2$:

$$s\left(\frac{x}{h}, \tau\right) = s_m + (s_0 - s_m) \operatorname{erf}\left(\frac{x/h}{2\sqrt{\tau}}\right), \quad (10.5)$$

где $\operatorname{erf}(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^U e^{-U^2} dU$ — функция ошибок Гаусса.

Результаты расчетов по формуле (10.5) для различных отношений x/h при поглощении газа, когда $s_m > s_0$, показаны на рис. 10.2, а, а при выделении газа, когда $s_0 > s_m$, — на рис. 10.2, б.

Так как удельный газовый поток через единицу поверхности, обращенную в вакуум,

$$q = -D \left. \frac{ds}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{(s_0 - s_m)D}{h} \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}, \quad (10.6)$$

то удельное количество газа, участвующего в массообмене,

$$a = \int_0^t q dt = -2(s_0 - s_m)h\sqrt{\tau/\pi}. \quad (10.7)$$

При этом средняя концентрация газа в теле

$$s_{cp} = s_0 - 2(s_0 - s_m)\sqrt{\tau/\pi}, \quad (10.8)$$

а степень массообмена, т. е. отношение количества газа, участвующего в массообмене, к полному количеству газа, находящемуся в твердом теле до начала массообмена,

$$\sigma = \frac{|a|}{s_0 h} = 2 \left(1 - \frac{s_m}{s_0}\right) \sqrt{\tau/\pi}. \quad (10.9)$$

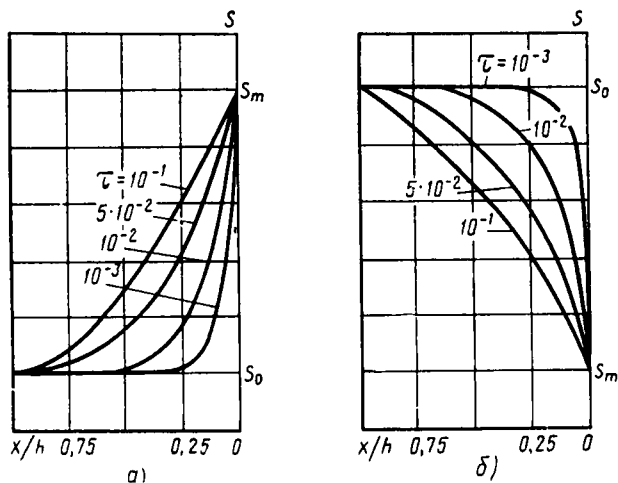


Рис. 10.2. Распределение концентрации в полубесконечном теле для различных значений безразмерного времени:

а — газопоглощение; б — газовыделение

Степень массообмена определяет абсолютную степень обезгаженности или газонасыщенности тела и может являться расчетным критерием для выбора типового технологического процесса обработки деталей в вакууме.

Критерием для выбора времени технологического процесса, связанного с выделением или поглощением газа, может служить эффективность массообмена

$$\nu = \frac{\sigma}{(s_0 - s_m)/s_0} = 2\sqrt{\tau/\pi}, \quad (10.10)$$

которая представляет собой отношение достигнутой степени массообмена к максимально возможной при данных условиях.

На рис. 10.3 показаны графики зависимости удельного безразмерного потока 1 и эффективности массообмена 2 от безразмерного времени τ .

Пользоваться приведенными формулами можно для твердых тел любой формы при $\tau \leq 0,1$, откуда следует приведенное ограничение по коэффициенту диффузии. При этом тело еще может считаться бесконечным в направлении оси x . Максимальная эффективность массообмена, которая может быть достигнута при условии $\tau \leq 0,1$, составляет 36%.

В тех случаях, когда требуется получить большие степени массообмена или $\tau > 0,1$, необходимо учитывать форму деталей, из которых выделяется или поглощается газ. Для этого нужно искать решение задачи (10.4) при новых граничных условиях. Для дета-

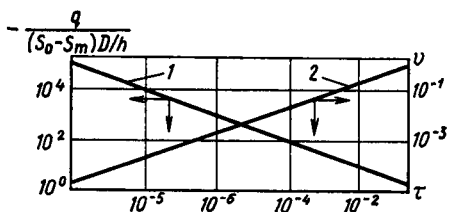


Рис. 10.3. Зависимость безразмерного потока 1 на границе газ — твердое тело и эффективности массообмена 2 от безразмерного времени

ре (более 1000°C) в печах вакуумного или водородного отжига. Для материалов, не допускающих высокотемпературной обработки, используется их охлаждение в процессе работы.

Рассмотренный случай газовыделения или газопоглощения относится к деталям, расположенным внутри вакуумной камеры. Для стенок вакуумной камеры кроме нестационарного диффузионного газовыделения из объема материала наблюдается газопроницаемость — дополнительный поток, являющийся следствием разности давлений газа в объемах, разделяемых перегородкой.

Рассмотрим *газопроницаемость* через стенку вакуумной камеры, имеющей форму неограниченной пластины, при несимметричных граничных условиях. Будем считать, что концентрация газа в пластине и давление со стороны вакуума s_0 и p_0 , а со стороны атмосферы — s_a и p_a . Начальная концентрация газа в пластине равна s_0 . Математическая формулировка задачи:
$$\frac{\partial s}{\partial t} = D \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}.$$

Граничные условия:

$$t = 0; \quad s(x, 0) = s_0; \quad x = 0; \quad s(0, t) = s_0;$$

$$t = \infty; \quad s(x, \infty) = (s_a - s_0) \frac{x}{2h} + s_0; \quad x = 2h; \quad s(2h, t) = s_a.$$

(10.11)

Решение задачи можно записать в функции безразмерного времени $\tau = Dt^2/h^2$:

$$s(x, t) = s_0 + \frac{s_a - s_0}{2h} x + \frac{2(s_a - s_0)}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k} \times \times \sin \frac{k\pi x}{2h} \exp\left(-\frac{\pi^2 k^2 \tau}{4}\right). \quad (10.12)$$

Тогда скорость газопроницаемости в момент времени τ

лей типовой формы — шара, пластины, цилиндра — такие решения имеются в специальной литературе.

Диффузионное газовыделение сильно зависит от рода материала и его предварительной обработки. Конструктивным способом борьбы с диффузионным газовыделением является выбор материалов, предварительно прошедших обезгаживание при высокой температуре

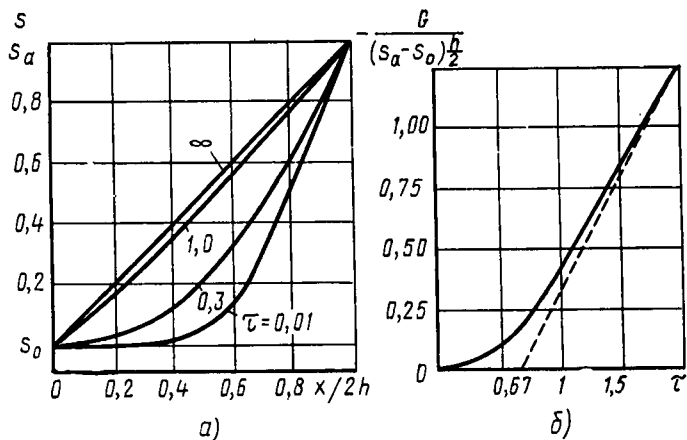


Рис. 10.4. Газопроницаемость стенки вакуумной камеры:
 а — распределение концентрации; б — количество газа, выделившееся из стенки

$$q = -D \frac{\partial s(0, t)}{\partial x} = -\frac{D(s_a - s_0)}{2h} - \frac{2(s_a - s_0)D}{2h} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \exp\left[-\frac{\pi^2 k^2 \tau}{4}\right]. \quad (10.13)$$

Общее количество газа, проникшего в вакуумную камеру за время t ,

$$G = -\int_0^t q dt = -\frac{(s_a - s_0) \tau h}{2} + \frac{(s_a - s_0) h}{3} + \frac{4(s_a - s_0) h}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 k^2 \tau}{4}\right). \quad (10.14)$$

На рис. 10.4, а показано распределение концентрации газа в стенке вакуумной камеры, а на рис. 10.4, б — количество газа, выделившееся из стенки в вакуумную камеру за время τ .

При $\tau > 0,67$ уравнение (10.13) можно упростить:

$$q = -\frac{(s_a - s_0) D}{2ht} \left[t - \frac{(2h)^2}{6D} \right]. \quad (10.15)$$

Это упрощенное уравнение позволяет рассчитать количество газа, выделившегося в вакуумную камеру:

$$G = qt = -\frac{(s_a - s_0) D}{2h} \left[t - \frac{(2h)^2}{6D} \right]. \quad (10.16)$$

Результаты расчетов по уравнению (10.16) показаны пунктиром на рис. 10.4, б. При $\tau \leq 0,67$ газопроницаемость считается равной нулю, а время задержки

$$t_s = \frac{\sqrt{0,67}h}{\sqrt{D}} = 0,82 \frac{h}{\sqrt{D}}. \quad (10.17)$$

Газовый поток *натекания* через течь меняется при изменении давления в вакуумной камере:

$$q_\tau = U_\tau (p_1 - p_2), \quad (10.18)$$

где U_τ — проводимость течи; p_1 и p_2 — давления снаружи и внутри вакуумной камеры.

Снижение давления в камере увеличивает поток натекания. Проводимость течи может уменьшаться по мере снижения давления при существовании в ней различных режимов течения газа.

Условный диаметр течи для цилиндрического капилляра длиной l , равной толщине стенки при молекулярном режиме течения, можно определить по формуле

$$d_{y\tau} = \sqrt[3]{\frac{q_\tau l}{121 (p_1 - p_2)}}, \quad (10.19)$$

Режим натекания определяют по критерию Кнудсена для среднего давления в капилляре $(p_1 + p_2)/2$. В том случае, когда гипотеза о существовании молекулярного режима течения не выполняется, $d_{y\tau}$ можно пересчитать по формулам для молекулярно-вязкостного и вязкостного режимов (см. табл. 3.7).

§ 10.3. Расчет времени откачки сосредоточенных объектов

Определим время откачки объекта в условиях квазистационарного режима работы вакуумной системы. Будем считать, что условие (10.1) выполняется. Дополнительно предположим, что на внутренней поверхности нет адсорбированных газов, а течение газа происходит изотермически, т. е. $pV = \text{const}$. Продифференцировав это равенство, поделив обе его части на dt и учитывая, что $dV/dt = S$, получим

$$dt = - \frac{V dp}{Sp}. \quad (10.20)$$

Проинтегрируем уравнение (10.20) в пределах от t_1 и p_1 до t_2 и p_2 :

$$\Delta t = t_2 - t_1 = -V \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{Sp}. \quad (10.21)$$

В общем случае быстрота откачки объекта в нестационарном режиме S в подинтегральном выражении уравнения (10.21) есть функция давления

$$S = S_n K_n - Q/p, \quad (10.22)$$

где S_n — быстрота откачки насоса; K_n — коэффициент использования насоса; $K_n = \frac{U}{S_n + U}$; U — проводимость; p — текущее давление; Q — суммарное газовыделение и натекание.

Рассмотрим частные случаи:

1. Пусть $S = \text{const}$. Такой случай возможен для высоковакуумных насосов при молекулярном режиме течения газа по трубопроводу, когда $S_n = \text{const}$; $U = \text{const}$; $Q \approx 0$. Тогда из (10.21) время откачки объекта от давления p_1 до p_2

$$\Delta t_1 = 2,3 \frac{V}{S_n K_n} \lg \frac{p_1}{p_2}. \quad (10.23)$$

2. Пусть $S_n = \text{const}$; $U = Cp$; $Q = 0$. Этот случай характерен для работы вращательных насосов при вязкостном режиме течения газа по трубопроводу. Аналогично выражению (10.21) будем иметь

$$\Delta t_2 = -V \int_{p_1}^{p_2} \frac{S_n + Cp}{S_n Cp^2} dp = \frac{V}{C} \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} \right) + 2,3 \lg \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \frac{V}{S_n}. \quad (10.24)$$

В общем случае, когда упрощения недопустимы и Q нельзя считать равным нулю, необходимо пользоваться графоаналитическим методом расчета времени откачки. Построим графики эффективной быстроты откачки вакуумных насосов в откачиваемом объеме $S_{\text{эф}i} = f_i(p)$ и быстрот газовой выделения и натекания $S_Q = Q/p$ на рис. 10.5, где предполагается, что в вакуумной системе имеется три последовательно работающих насоса.

Разобьем весь диапазон давлений от атмосферного до рабочего на несколько участков, в каждом из которых определим среднее значение:

$$S_{\text{ср}i} = \frac{(S_{\text{эф}i} - S_{Qi}) + (S_{\text{эф}(i+1)} - S_{Q(i+1)})}{2}.$$

Время откачки в этом случае может быть рассчитано по формуле (10.23), применение которой на всех участках дает

$$\Delta t_r = 2,3V \left(\frac{1}{S_{\text{ср}1}} \lg \frac{p_1}{p_2} + \dots + \frac{1}{S_{\text{ср}i}} \lg \frac{p_i}{p_{i+1}} + \dots + \frac{1}{S_{\text{ср}n}} \lg \frac{p_n}{p_{n+1}} \right), \quad (10.25)$$

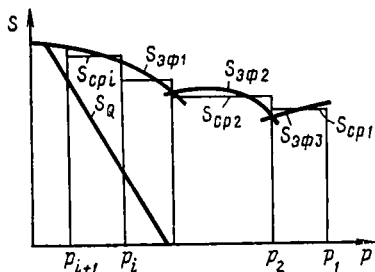


Рис. 10.5. Графоаналитический расчет времени откачки в вакуумных системах с сосредоточенным откачиваемым объемом

где n — число участков, на которое разбит весь диапазон изменения давления в установке.

При отсутствии предварительного прогрева стенок вакуумной системы необходимо при определении времени откачки учитывать десорбцию паров воды при изменении давления в вакуумной камере.

Для расчета времени откачки вакуумной системы, содержащей двухкомпонентную смесь сухого воздуха и паров воды, запишем два уравнения изотермического процесса откачки:

$$p_1 V_k = \text{const}, \quad (10.26)$$

$$p_2 V_k + a F_r = \text{const},$$

где p_1 — давление воздуха без учета давления паров воды, Па; p_2 — давление паров воды в воздухе, Па; a — количество паров воды, адсорбированное на единице геометрической поверхности камеры, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{м}^2$; F_r — геометрическая площадь поверхности камеры, м^2 ; V_k — объем камеры, м^3 .

Продифференцировав уравнения системы (10.26) и разделив на dt , считая, что адсорбционное равновесие устанавливается мгновенно, получим

$$V_k \frac{dp_1}{dt} + S_0 p_1 = 0, \quad (10.27)$$

$$V_k \frac{dp_2}{dt} + S_0 p_2 + F_r \frac{da}{dt} = 0, \quad (10.28)$$

где S_0 — эффективная быстрота откачки насоса, $\text{м}^3 / \text{с}$.

Подставляя в уравнение (10.28) выражение для a , в соответствии с уравнением Фрейндлиха (10.3) после интегрирования при условии $S_0 = \text{const}$ получим

$$t = 2,3 \frac{V_k}{S_0} \lg \left(\frac{p_{2н}}{p_{2к}} \right) + \frac{F_r K}{S_0 (1-n)} \left[p_{2н}^{\frac{1}{1-n}} - p_{2к}^{\frac{1}{1-n}} \right], \quad (10.29)$$

где $p_{2н}$ и $p_{2к}$ — начальное и конечное давления паров воды при откачке. Пользуясь уравнением (10.29), можно найти время откачки t , необходимое для снижения давления паров воды в камере от начального давления $p_{2н}$ до конечного $p_{2к}$.

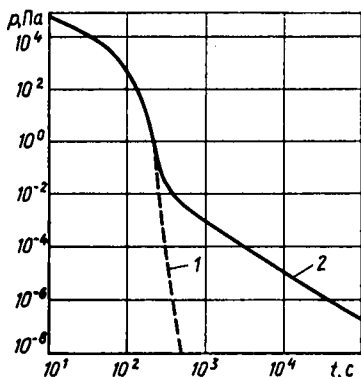


Рис. 10.6. Кривые откачки вакуумной камеры объемом $0,1 \text{ м}^3$ и внутренней геометрической поверхностью 1 м^2 насосом с быстротой откачки $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$:

1 — без учета десорбции воды; 2 — с учетом десорбции воды

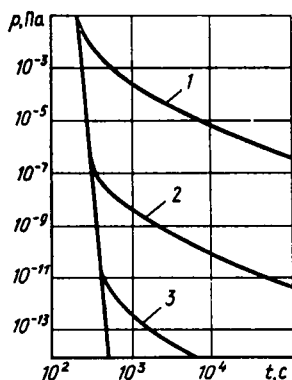


Рис. 10.7. Кривые откачки вакуумной камеры ($V=0,1 \text{ м}^3$, $F=1 \text{ м}^2$, $S_0=5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) при различных температурах вакуумной системы и откачиваемого объекта: 1 — 298 К; 2 — 400 К; 3 — 500 К; 4 — 600 К

После интегрирования уравнения (10.27) при $S_0 = \text{const}$ получим, аналогично (10.23),

$$t = 2,3 \frac{V_{\text{к}}}{S_0} \lg \left(\frac{p_{1\text{н}}}{p_{1\text{к}}} \right), \quad (10.30)$$

где $p_{1\text{н}}$ и $p_{1\text{к}}$ — начальное и конечное давления воздуха без учета давления паров воды. Уравнения (10.29) и (10.30) позволяют по известному времени откачки t определить конечное давление двухкомпонентной смеси, равное сумме давлений сухого воздуха и паров воды.

Согласно проведенным исследованиям, время откачки влажного и сухого воздуха при давлениях $10^5 \dots 10^0 \text{ Па}$ практически совпадает, заметное влияние адсорбированных паров воды на время откачки вакуумных систем после напуска атмосферного воздуха проявляется при давлении ниже 10 Па , а при давлении меньше 10^{-3} Па время откачки двухкомпонентной смеси полностью определяется десорбционным газовыделением паров воды с внутренних стенок вакуумной камеры.

Пренебрегая наличием паров воды в составе остаточных газов, можно допустить большую ошибку при определении времени откачки.

Например, на рис. 10.6 приведены кривые откачки вакуумной камеры при $V_{\text{к}}=0,1 \text{ м}^3$, $F_{\text{г}}=1 \text{ м}^2$, $S_0=5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. При откачке от атмосферного давления до 10^{-4} Па реальное время откачки больше, чем рассчитанное без учета десорбции паров воды в 10 раз, а при откачке до 10^{-6} Па — в 100 раз.

Влияние температуры на время откачки показано на рис. 10.7, из которого видно, что для вакуумных систем с предельным давлением больше 10^{-11} Па нагрев вакуумной системы до 500 К позволяет существенно сократить время откачки и не учитывать присутствие паров воды в составе остаточных газов при определении времени откачки.

§ 10.4. Расчет времени откачки распределенных вакуумных объектов

Определим время откачки в нестационарном режиме для трубопровода с распределенным объемом без учета газовыделения с его стенок. Один конец трубопровода закрыт заглушкой, а другой присоединен к насосу с очень большой быстротой откачки, т. е. в открытом сечении трубопровода давление можно считать равным нулю.

Разность газовых потоков, проходящих через сечения трубопровода, отстоящие на dx , определяет скорость удаления газа:

$$F dx \frac{\partial p}{\partial t} = -Ul \frac{\partial p}{\partial x} + Ul \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} dx \right),$$

где F — площадь поперечного сечения трубопровода; U, l — проводимость и длина трубопровода.

Записанное выражение после сокращения можно представить в виде дифференциального уравнения $\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$ (где $D = Ul/F$), имеющего следующие начальные и граничные условия: $t=0, p = p_1$; $x=0, dp/dx=0$; $x=l, p=0$.

Решение этого уравнения:

$$p = p_1 \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{(2k-1)} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2k-1) \frac{x}{l} \right] \times \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2k-1)^2 \tau \right], \quad (10.31)$$

где $\tau = Dt/l^2 = \frac{Ut}{V}$; $V = Fl$ — объем трубопровода.

Для $\tau \geq 0,1$ и $x=0$ уравнение (10.31) можно упростить:

$$p \approx p_1 \frac{4}{\pi} \exp \left(-\frac{\pi^2}{4} \tau \right). \quad (10.32)$$

Отсюда следует выражение для времени снижения давления от p_1 до p_2 в закрытом сечении трубопровода:

$$\Delta t \cong \frac{V}{U} \lg \frac{p_1}{p_2}. \quad (10.33)$$

В том случае, когда U зависит от давления p ,

$$\Delta t = V \left(\frac{1}{U_1} \lg \frac{p_1}{p_2} + \dots + \frac{1}{U_l} \lg \frac{p_l}{p_{l+1}} + \dots + \frac{1}{U_n} \lg \frac{p_n}{p_{n+1}} \right), \quad (10.34)$$

где $U_1, \dots, U_l, \dots, U_n$ — среднее значение в соответствующих диапазонах давления.

§ 10.5. Расчет форвакуумных баллонов

При последовательном соединении вакуумных насосов между ними можно устанавливать дополнительные откачиваемые объекты, называемые форвакуумными баллонами.

Форвакуумный баллон позволяет во время работы установки выключать на длительное время насос предварительного разрежения. Поток газа, откачиваемый высоковакуумным насосом, попадает в форбаллон и увеличивает давление в нем от минимального p_m , которое достигается при работающем форвакуумном насосе, до максимального p_k , близкого к максимальному выпускному давлению высоковакуумного насоса. Промежуток времени, в течение которого может быть отключен форвакуумный насос, удобно выбирать равным времени стационарного режима работы установки.

Если весь поток газа, проходящий через высоковакуумный насос, идет на повышение давления в форбаллоне, то можно записать уравнение сохранения массы

$$Qt' = V_\phi (p_k - p_n),$$

где V_ϕ — объем форбаллона; t' — время работы после отключения форвакуумного насоса.

Объем форбаллона из полученного уравнения

$$V_\phi = \frac{Qt'}{p_k - p_n}. \quad (10.35)$$

Здесь

$$p_k = (0,3 \dots 0,5) p_v; \quad p_n = \frac{Q}{S_n K_n};$$

где p_v — максимальное выпускное давление высоковакуумного насоса; S_n — быстрота откачки форвакуумного насоса; K_n — коэффициент использования вращательного насоса при откачке форбаллона до давления p_n .

Если в форбаллоне расположить адсорбент, количество поглощенного газа в котором

$$A = K_T p G,$$

где G — насыпной объем адсорбента, m^3 ; p — давление, Па, A — количество поглощенного газа в $m^3 \cdot Pa$; K_T — коэффициент адсорбции при температуре T (для активированного угля СКТ

$K_{293} = 10^2 \dots 10^3$; $K_{77} = 10^6 \dots 10^7$), то уравнение для расчета форбаллона с адсорбентом записывают в таком виде:

$$Qt'' = V_{\phi} (p_k - p_n) + K_T G (p_k - p_n),$$

откуда

$$V_{\phi} = \frac{Qt'' - K_T G (p_k - p_n)}{p_k - p_n}, \quad (10.36)$$

где t'' — время работы форбаллона с адсорбентом.

Если весь форбаллон заполнен адсорбентом, то $G = V_{\phi}$. С учетом пористости адсорбента ϵ уравнение сохранения массы $Qt'' = \epsilon V_{\phi} (p_k - p_n) + K_T V_{\phi} (p_k - p_n)$, откуда объем форбаллона

$$V_{\phi} = \frac{Qt''}{(p_k - p_n)(K_T + \epsilon)}. \quad (10.37)$$

Сравнивая (10.35) и (10.37), можно определить, во сколько раз увеличится продолжительность работы форбаллона при его заполнении адсорбентом $t'/t'' = K + \epsilon$, где t' и t'' — соответственно время работы форбаллона с адсорбентом и без адсорбента. Для $T = 293$ К $K_{293} = 10^2$; $\epsilon = 0,5$; $t'/t'' = 10^2$. Для $T = 77$ К $K_{77} = 10^6$; $\epsilon = 0,5$; $t'/t'' = 10^6$.

Таким образом, применение адсорбента в форбаллоне при комнатной температуре уменьшает его объем в 10^2 раз, а при температуре жидкого азота — 10^6 раз.

§ 10.6. Методика проверочного расчета

Проверочный расчет вакуумной системы в нестационарном режиме работы для определения времени откачки часто выполняется для вакуумных систем, спроектированных из условий стационарного режима работы. Необходимость такого расчета возникает также при проектировании новых вакуумных систем, работающих только в нестационарном режиме, в связи с малой точностью проектировочных расчетов.

Для такого расчета в качестве исходных данных следует задать: 1) вакуумную схему установки; 2) характеристики насосов: быстроту действия, предельное давление, давление запуска; 3) характеристики арматуры и трубопроводов; размеры и проводимости; 4) характеристики откачиваемых объектов: размеры и объем; 5) суммарное газовыделение и натекание при нестационарном режиме работы; 6) рабочее давление.

Порядок расчета: 1) проверка условия квазистационарности; 2) построение графиков эффективной быстроты откачки насосов в откачиваемом объекте и быстроты натекания; 3) расчет времени откачки объекта до рабочего давления.

Условие квазистационарности (10.1) проверяется по характеристикам откачиваемого объекта и трубопроводов, которые имеются

в исходных данных. В результате проверки этого условия уточняется характер нестационарного режима работы, что оказывает влияние на выбор расчетных формул для определения времени откачки. При квазистационарном режиме откачки сосредоточенных объемов можно пользоваться формулами (10.25) и (10.29), а при откачке вакуумных систем с распределенным объемом — формулой (10.34).

Для определения времени откачки строят графики эффективной быстроты откачки всех насосов

$$S_{\text{эф}i} = \frac{S_{ni}U_i}{S_{ni} + U_i}$$

в зависимости от давления для сечений входа в откачиваемый объект; S_{ni} — быстрота действия насоса (в зависимости от входного давления задается в виде графика); U_i — проводимость вакуумной системы от i -го насоса до откачиваемого объекта (определяется по характеристикам арматуры и трубопроводов из исходных данных и в общем случае также является функцией давления).

Затем строят график быстроты газовыделения и натекания $S_Q = Q/p$, который в логарифмических координатах, если Q не зависит от давления, имеет вид прямой линии.

При выполнении условия квазистационарности расчет ведется по формуле (10.25) с разбивкой на участки с постоянным $S_{\text{ср}}$ в соответствии с рис. 10.5.

Если условие квазистационарности не выполнено, то в молекулярно-вязкостном и вязкостном режимах пользуемся графиком $U(p)$, разделяя его на участки p_i, \dots, p_{i+1} , внутри которых используется среднее значение U_i ; расчет ведется по формуле (10.34).

Расчет времени работы форбаллонов без адсорбента осуществляется по формуле (10.35), которую можно представить в виде

$$t' = \frac{(0,5p_b S_n K_n - Q) V_{\phi}}{Q S_n K_n}. \quad (10.38)$$

Если форбаллон полностью заполнен адсорбентом, то из (10.37) получим время работы форбаллона:

$$t'' = \frac{[0,5p_b - Q/(S_n K_n)] (K_T + \varepsilon) V_{\phi}}{Q}. \quad (10.39)$$

где K_T и ε — постоянная адсорбируемости и пористость адсорбента.

§ 10.7. Методика проектировочного расчета

Задачей проектировочного расчета вакуумной системы в нестационарном режиме является выбор откачных средств, арматуры и

размеров трубопроводов из условия обеспечения заданного времени откачки от начального до рабочего давления, при котором осуществляется стационарный режим работы.

Исходными данными для расчета являются: 1) начальное и конечное давления в откачиваемом объекте p_1 и p_2 ; 2) характеристики откачиваемого объекта: объем V , диаметр d и длина l ; 3) время откачки в нестационарном режиме t_n ; 4) дополнительные условия.

Вакуумную схему выбирают в зависимости от требуемой степени вакуума, определяемой по рабочему давлению и диаметру откачиваемого объекта.

Если для откачки до рабочего давления требуется несколько насосов, то общее время откачки должно быть распределено между всеми насосами.

Для выбора номинальной быстроты действия насоса примем, что существует квазистационарный режим работы вакуумной установки.

В области низкого вакуума, воспользовавшись формулой (10.23), получим, что для снижения давления от p_1 до p_2 в камере объемом V за время Δt_1 требуется насос с номинальной быстротой действия

$$S_{m1} = 2,3 \frac{V}{\Delta t_1 K_{и1}} \lg \frac{p_1}{p_2}, \quad (10.40)$$

где p_1 — начальное давление (обычно равно атмосферному); p_2 — граничное давление в откачиваемом объекте между вязкостным и молекулярно-вязкостным режимами.

Коэффициент использования насоса $K_{и1}$ в области низкого вакуума — величина переменная из-за зависимости проводимости элементов вакуумной системы от давления. Для расчетов с насосом принимаем для $K_{и1}$ минимальное значение, соответствующее стационарному режиму течения при давлении p_2 . Методика выбора оптимального $K_{и}$ по эффективной скорости откачки и числу элементов на участке вакуумной системы от насоса до откачиваемого объекта изложена в гл. 9. В качестве эффективной скорости откачки приближенно может быть принято значение, определенное по формуле (10.40) при $K_{и1} = 1$.

В области среднего вакуума давление изменяется от p_2 до p_3 . Коэффициент использования насоса $K_{и2}$ определяется с насосом при давлении p_3 и соответствует молекулярному режиму течения газа.

Номинальную быстроту действия насоса определяем по формуле, аналогичной (10.40):

$$S_{m2} = \frac{2,3V}{\Delta t_2 K_{и2}} \lg \frac{p_2}{p_3}. \quad (10.41)$$

В области высокого и сверхвысокого вакуума за время Δt_3

откачки осуществляется от давления p_3 до давления p_k , которое равно рабочему давлению, заданному в исходных данных. Номинальная быстрота действия насоса может быть определена из уравнения

$$S_{m3} = \frac{2,3V}{\Delta t_3 K_{и3}} \lg \frac{p_3}{p_k}, \quad (10.42)$$

где $K_{и3}$ — коэффициент использования высоковакуумного насоса, определяемый по методике, изложенной в гл. 9.

Общая проводимость между насосом и откачиваемым объектом

$$U_{0j} = S_{mj} \frac{K_{иj}}{1 - K_{иj}}, \quad (10.43)$$

где j — номер соответствующего насоса.

Определенное по формуле (10.43) значение общей проводимости U_{01} соответствует давлению p_2 — нижней границе вязкостного режима течения в откачиваемом объекте, U_{02} — давлению p_3 — нижней границе молекулярно-вязкостного режима течения в откачиваемом объекте.

Далее выбор элементов вакуумной системы не отличается от уже рассмотренного при стационарном режиме. Общая проводимость выражается через проводимости последовательно соединенных элементов. Разрабатывается компоновочная схема, из которой определяются длины трубопроводов. Выбирают стандартные элементы — клапаны, ловушки. По проводимостям и длинам трубопроводов находят их диаметры. В случае необходимости проектируют нестандартные элементы, составляя их эквивалентные схемы из элементов с известными проводимостями. После определения размеров трубопроводов необходимо найти их объем и проверить принятое условие квазистационарности (10.1).

Объем форбаллона из условия его работы в течение всего времени существования стационарного режима можно определить, воспользовавшись формулой (10.35):

$$V_{\Phi} = \frac{Qt_c}{0,5p_b - Q/(S_{н}K_{и})}, \quad (10.44)$$

где p_b — максимальное выпускное давление предыдущего насоса; $S_{н}$, $K_{и}$ — быстрота откачки и коэффициент использования последующего насоса.

В том случае, если объем, рассчитываемый по формуле (10.44), соизмерим с объемом трубопровода, то от применения форбаллона можно отказаться. Если величина объема велика, соизмерима с размерами вакуумного агрегата, то можно применять форбаллон с адсорбентом, объем которого определяется по формуле

(10.37), которую в данном случае можно записать в виде

$$V_{\Phi} = \frac{Qt_c}{[0,5p_v - Q/(S_n K_n)](K_T + \varepsilon)},$$

где K_T и ε — постоянная адсорбируемости и пористость адсорбента.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем отличия между стационарным, квазистационарным и нестационарным режимами работы вакуумных установок?
2. Каковы источники газовых нагрузок при работе вакуумной системы в нестационарном режиме?
3. Каково влияние паров воды на время откачки вакуумных систем?
4. При каких условиях при расчете диффузионного газовыделения реальное тело может считаться бесконечным в направлении диффузии?
5. Чем определяется время задержки при газопроницаемости?
6. Что такое условный диаметр течи?
7. Зачем применяется прогрев стенок вакуумной камеры перед ее откачкой?
8. Каково назначение форвакуумного баллона?
9. Зачем адсорбент размещают в форвакуумном баллоне?
10. Каковы задачи проверочного и проектировочного расчетов вакуумной системы, работающей в нестационарном режиме?

ГЛАВА 11

КОНСТРУИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

§ 11.1. Конструкционные вакуумные материалы

Конструкция вакуумных систем во многом определяется свойствами используемых материалов. В дополнение к обычным требованиям — прочности, технологичности, легкости и т. д. — вакуумная техника выдвигает к конструкционным материалам ряд специфических требований: 1) упругость паров материала при рабочей температуре должна быть значительно ниже рабочего давления; 2) газовыделение материала при рабочем давлении и температуре должно быть минимальным; 3) газопроницаемость материала в рабочих условиях должна быть минимальной; 4) вакуумная герметичность при малых толщинах; 5) коррозионная стойкость; 6) отсутствие ползучести вплоть до температур 500—600°C; 7) неагрессивность.

Если упругость паров материалов при рабочей температуре больше или равна рабочему давлению, то это приводит к интенсивному распылению указанного материала и нежелательному образованию напыленных слоев на поверхностях различных деталей, например изоляторах электрических вводов и т. д.

Давление насыщенных паров конструкционных вакуумных материалов при различных температурах

Материалы	Температура, °С		Материалы	Температура, °С	
	20	500		20	500
Ртуть	10^{-1}	10^6	Серебро	—	10^{-7}
Цинк	10^{-12}	10^2	Олово	—	10^{-8}
Индий	10^{-18}	10^{-6}	Алюминий	—	10^{-8}
Золото	—	10^{-9}	Медь	—	10^{-9}

В табл. 11.1 приведены упругости паров некоторых конструкционных материалов при двух характерных для вакуумных систем рабочих температурах. Если латунь разогревать в высоком вакууме до температуры 500°С, то входящий в ее состав цинк испаряется и образуется пористый газопроницаемый материал. Наличие в вакуумной системе смазок и масел ограничивает возможности получения низких давлений (см. табл. 2.6).

Газовыделение материалов при рабочем давлении и температуре определяется наличием в объеме материала растворенных газов, а на поверхности — адсорбированных. Для удаления газов, растворенных в металлах, применяют их переплав под вакуумом. Поверхности вакуумных материалов должны быть тщательно очищены от загрязнений, являющихся дополнительным источником газовыделения.

Для улучшения условий очистки внутренние поверхности элементов вакуумных систем желательно обрабатывать до средней высоты микронеровностей 5...10 мкм для высоковакуумных и 0,5...1 мкм для сверхвысоковакуумных систем. Газовыделение конструкционных вакуумных материалов (табл. 11.2) зависит от способа предварительной обработки. Эффективным способом уменьшения газовыделения является высокотемпературное вакуумное обезгаживание, уменьшающее концентрацию газов, растворенных в объеме материала. Уменьшения газовыделения водорода из нержавеющей стали можно добиться созданием оксидных пленок или нанесением покрытия из алюминия, серебра, меди и т. д. Наличие поверхностной пленки затрудняет переход растворенных атомов из кристаллической решетки на поверхность, что при неизменной концентрации растворенных газов значительно снижает газовыделение.

Газопроницаемость материала в рабочих условиях свойственна многим материалам, но в некоторых случаях она особенно велика. Так, серебро пропускает кислород; железо, никель, платина, палладий — водород; стекло — гелий и водород; резина — гелий, во-

Газовыделение нержавеющей стали

Способы обработки	Скорость газовыделения, м ³ .Па/(с.м ²)			
	Время с начала откочки, ч			
	1	5	10	20
Без обработки	4·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	4·10 ⁻⁶	2·10 ⁻⁶
Механическая полировка	4·10 ⁻⁶	—	2·10 ⁻⁷	—
Ультразвуковая очистка	4·10 ⁻⁶	2·10 ⁻⁶	7·10 ⁻⁷	4·10 ⁻⁷
Хонингование стеклянными шариками	—	2·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁷	5·10 ⁻⁸
Химическая очистка	1·10 ⁻⁵	4·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁶	2·10 ⁻⁶
Химическое полирование	2·10 ⁻⁶	8·10 ⁻⁷	5·10 ⁻⁷	3·10 ⁻⁷
Электролитическое полирование	1·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁶	8·10 ⁻⁷	3·10 ⁻⁷
Вакуумное обезгаживание при 300°C в течение 2 ч	1·10 ⁻⁶	—	4·10 ⁻⁷	2·10 ⁻⁷
Высокотемпературное вакуумное обезгаживание	10 ⁻⁹	—	—	—
Окисление на воздухе при T=450°C	7·10 ⁻¹⁰	—	—	—
Покрытие алюминием	5·10 ⁻¹⁰	—	—	—

дород и азот. Проницаемости некоторых вакуумных материалов представлены в табл. 11.3.

Таблица 11.3

Газопроницаемость вакуумных материалов при различных температурах (толщина стенки 1 мм, перепад давлений 1 Па)

Материалы	Газ	Проницаемость, м ³ .Па·мм/(м ² .с.Па)		Материалы	Газ	Проницаемость, м ³ .Па·мм/(м ² .с.Па)	
		Температура, С				Температура, С	
		20	400			20	400
Железо	H ₂	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	Резина 7889	N ₂	10 ⁻⁸	—
Железо	N ₂	10 ⁻¹⁹	10 ⁻⁹	Резина 9024	N ₂	10 ⁻⁹	—
Палладий	H ₂	10 ⁻⁷	10 ⁻⁵	Резина ИРП-1015	N ₂	10 ⁻⁹	—
Медь	H ₂	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁸	Фторопласт-4	N ₂	10 ⁻⁹	—
Серебро	O ₂	10 ⁻¹³	10 ⁻⁸	То же	O ₂	10 ⁻⁹	—
Кварц	H ₂	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁰	»	He	10 ⁻⁸	—
Кварц	He	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	»	H ₂	10 ⁻⁸	—
Стекло С47-1	He	10 ⁻¹²	10 ⁻⁹	Полиэтилен	H ₂	10 ⁻⁸	—
Стекло С89-2	He	10 ⁻¹⁵	10 ⁻¹⁰	»	H ₂ O	10 ⁻⁷	—
Стекло С38-1	He	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁸	То же	He	10 ⁻⁸	—

Вакуумные материалы при малых толщинах должны быть герметичны. Литые материалы чаще всего не удовлетворяют этим требованиям, так как обладают пористой структурой. Листовой и сортовой прокат имеет неодинаковые вакуумные плотности в различных направлениях. Шлаковые включения образуют волокна в направлении деформации материала при его обработке. Негерметичность таких волокон часто можно обнаружить только после прогрева в вакууме. Ремонт деталей, в которых обнаружены такие течи, практически невозможен, так как припой не смачивает шлаковые включения, а при разогреве во время сварки из них выделяются газы, образующие поры. При проектировании тонкостенных деталей нужно следить за тем, чтобы шлаковые волокна не были направлены поперек стенки, например при проектировании днищ нежелательна замена листового проката сортовым и т. д. Наилучшей вакуумной плотностью обладают металлы, подвергнутые вакуумному переплаву.

Коррозионная стойкость необходима вакуумным материалам в связи с тем, что коррозия увеличивает газовыделение материалов, уменьшает прочность тонкостенных деталей, сопровождается появлением натеканий.

Требования к коррозионной стойкости материалов особенно велики при создании сверхвысоковакуумных установок, которые должны регулярно прогреваться при температуре 400...500°C. Медь, например, при такой температуре в воздушной среде настолько быстро корродирует, что ее нельзя применять в качестве материала для изготовления часто прогреваемых деталей, соприкасающихся с атмосферой.

Нагруженные детали прогреваемых вакуумных установок не должны обладать заметной ползучестью вплоть до максимальных рабочих температур 500...600°C. Ползучесть материалов, из которых изготовлены детали разборных фланцевых соединений, приводит к их разгерметизации после определенного числа циклов прогрева вакуумных установок.

Немагнитность является специфическим требованием отдельных деталей вакуумных систем, через которые осуществляется ввод магнитного потока в вакуумную камеру. Такие детали обязательно имеются в конструкциях магнитных вводов движения в вакуум, магниторазрядных насосах и манометрических преобразователях.

В вакуумной технике широко применяются такие конструкционные материалы, как чугун, сталь, медь, тугоплавкие металлы, специальные сплавы, стекло, керамика, пластмассы, резина, масла, замазки, клей и т. д.

Чугун применяется для изготовления корпусных деталей, работающих в масле в условиях низкого вакуума. Применяются особо плотные, мелкозернистые чугуны марок МС424-48 и СЧ24-44. Из других литейных сплавов используются бронзы, не содержащие

цинка, кадмия и фосфора БрБ2 (2% Ве), БрА5 (5% Al) и алюминиевые сплавы АЛ2, АЛ5, АЛ9.

Конструкционная качественная малоуглеродистая сталь 08, 10, 15, 20 ($\sigma_b = 320 \dots 440$ МПа) хорошо паяется и сваривается и может применяться для изготовления непрогреваемых деталей вакуумных систем при получении низкого и среднего вакуума. Сталь 45 ($\sigma_b = 640$ МПа) сваривается значительно хуже и не рекомендуется для сварных вакуумных соединений, но может быть использована для изготовления непрогреваемых резьбовых деталей, валов и других нагруженных деталей. Для деталей прогреваемых высоковакуумных систем рекомендуются нержавеющие стали с содержанием хрома более 13%, не подверженные межкристаллической коррозии при повышенных температурах. В вакуумной технике широко применяется нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, кислотостойкая, немагнитная, хорошо сваривается и паяется со специальными флюсами. Нержавеющие стали 1Х21Н5Т и Х17Г9АН4 в нагартованном состоянии прочнее стали 12Х18Н10Т и могут применяться для изготовления сильно нагруженных деталей — болтов, шпилек и т. д. Сталь Н36ХТЮ (ЭИ702) сохраняет хорошие упругие свойства до 600°C и может использоваться для изготовления пружинных компенсаторов в фланцевых соединениях. Состав и основные свойства этих сталей приведены в табл. 11.4.

Таблица 11.4

Нержавеющие стали, применяемые в вакуумной технике

Марки сталей	$\sigma_{вр}$, МПа	σ_T , МПа	Состав, %							
			С	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Fe	N ₂
12Х18Н10Т	540	200	0,12	0,8	1,5	18	10	0,7	Основа	—
1Х21Н5Т	600	350	0,14	0,8	0,8	21	5,5	0,8	»	—
Х17Г9АН4	700	350	0,12	0,8	9	17	4	—	»	0,2
Н36ХТЮ	750	—	0,05	0,6	0,8	15	35	0,9	»	—

Медь широко применяется в вакуумной технике для изготовления прокладок, внутренней арматуры и корпусов отпаянных приборов. Предел прочности мягкой меди 220...240 МПа, твердой — 450 МПа, предел ползучести 70 МПа при 20°C и только 14 МПа при 400°C. Рекомендуется применять марки наиболее чистой меди МБ (бескислородной), МО и М1. Присутствие кислорода в меди особенно вредно для сварки меди и пайки или отжига в водороде. Сварные швы получаются пористыми, а обработка в водороде приводит к восстановлению закиси меди с образованием водяных паров, создающих микроскопические области огромных давлений, приводящие к образованию мельчайших трещин в металле («водородная болезнь»): $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 = 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$.

Латуни Л62 (62% Cu и 38% Zn) и ЛС59-1 (59% Cu, 1% Pb, 40% Zn) применяются для изготовления деталей, не подвергающихся прогреву.

Алюминий марок АД1М, АМц применяется для изготовления прокладок, паропроводов масляных насосов, криогенных экранов и т. д. Коэффициент линейного расширения в интервале температур 20...300°C равен $25,5 \cdot 10^{-6}$, предел прочности 120 МПа. Алюминий хорошо сваривается гелиево-дуговой сваркой, давая вакуумно-плотные спаи. Дюралюминий Д1 или Д16 с пределом прочности 380...430 МПа не дает герметичных вакуумных швов.

В вакуумной технике широко применяются специальные сплавы с определенными физическими свойствами, необходимыми для создания некоторых узлов вакуумной аппаратуры. К ним относятся ковар (Н29К18А) с коэффициентом линейного расширения $(4,7 \dots 6,4) \cdot 10^{-6}$ для пайки со стеклами молибденовой группы С-47, С-49; сталь Х18ТФМ и сплав Н47Д5 с коэффициентами линейного расширения 10^{-5} и $8 \cdot 10^{-6}$ для пайки со стеклами С-87, С-89, С-90; сплавы Фени различных марок Н42, Н45, Н50 для пайки с различными группами стекол; Н33К17 для пайки со стеатитовой керамикой; инвар (Н36, ЭН36) с малым коэффициентом линейного расширения и теплопроводности.

Тугоплавкие металлы — вольфрам, молибден, тантал, ниобий — применяются для изготовления нагревателей, тепловых экранов, тоководов и т. д.

Из титана (ВТ1, ВТ3, Т3 и Т4) изготавливаются катоды и гетеры ионно-сорбционных насосов.

Стекло марок С-47, С-87 широко применяется в вакуумной технике для изготовления трубопроводов, кранов, ловушек, корпусов приборов, насосов, манометров, изоляторов электрических вводов и т. д. После буквы С в обозначении марки стекла следуют цифры, соответствующие коэффициенту линейного расширения, умноженному на 10^7 . Физические свойства стекол приведены в табл. 11.5.

В вакуумной технике керамика применяется вместо стекла для изготовления высокотемпературных изоляторов. Распространены следующие виды вакуумно-плотной керамики: стеатит, алундовая, форстерит, циркон. Наиболее термостойкой является алундовая керамика. (70...96% Al_2O_3) с температурой размягчения 1900°C и прочностью на сжатие 2000 МПа. Алундовая керамика хорошо паяется методом металлизации или активных припоев. Стеатит и форстерит изготавливаются на основе талька с добавлением оксида магния, углекислого бария и высококачественной глины. Пайка стеатита с металлами затруднена, а форстерит паяется с титаном и дает с ним согласованные спаи. Циркон имеет хорошую теплопроводность, но очень тверд и не может обрабатываться после обжига.

Физические свойства стекол

Марки стекол	$\alpha \cdot 10^7$ (при 20... 200° С)	$\sigma_{вр}$, МПа		Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Температура размягчения T_p , °С	Термостойкость Δt , °С
		сжатие	растяжение			
Кварцевое	5,5...6,1	1800	95	0,096	1500	—
С-37 (вольфрамовое)	36...39	1100	84	0,072	796...816	185
С-47 (молибденовое)	46...48	1090	90,5	0,050	580...600	200
С-87 (свинцовое)	86...90	850	50	0,038	480...500	100

Из пластмасс в вакуумной технике делаются многие детали: уплотнители, мембраны, изоляторы, гибкие трубопроводы и т. д.

Широко распространен фторопласт-4, хорошо обрабатываемый резанием, а при условии медленной деформации — и давлением. При температуре выше 200°С из фторопласта начинается выделение фтористых соединений. Хрупкость наступает при температурах менее —70°С. Газовыделение у фторопласта меньше, чем у резины, он обладает хорошими электроизоляционными свойствами и очень малым коэффициентом трения.

Фторопласт-4 имеет следующие физические свойства:

Плотность, кг/м ³	(2,1 ... 2,3) · 10 ³
Предел прочности при растяжении, МПа . .	14
Предел упругости при сжатии, МПа	3
Максимальная рабочая температура, °С	200
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С) .	0,006
Коэффициент линейного расширения	(55 ... 210) · 10 ⁻⁶
Диэлектрическая проницаемость	1,9 ... 2,2
Электрическая прочность, кВ/мм	26
Газовыделение, м ³ ·Па/(м ² ·с)	10 ⁻⁴
Газопроницаемость по азоту и кислороду (при 20°С), м ³ ·Па·мм/(м ² ·с·Па)	10 ⁻⁹

Полиэтилен обладает малым газовыделением, но из-за недостаточной теплостойкости может применяться только при комнатной температуре.

Широко распространена, особенно в технике низкого вакуума, вакуумная резина. Ее газовыделение значительно меньше, чем у обычной резины, но все же много больше, чем у фторопласта. Кроме того, резина имеет большую, чем фторопласт, газопроницаемость. Термостойкость резины мала, но самые термостойкие сорта имеют рабочую температуру около 300°С. Преимуществом резины являются отличные упругие свойства, благодаря которым она является прекрасным материалом для вакуумных уплотнителей. Вакуумные

резины делятся на обычные и термостойкие, на маслостойкие и немаслостойкие.

Немаслостойкая белая вакуумная резина 7889 очень эластичная с малой газопроницаемостью. Диапазон рабочих температур от +90 до -10°C.

Маслостойкая черная резина 9024, ИРП-1015 имеет худшую эластичность и большее газовыделение, но меньшую газопроницаемость по сравнению с резиной 7889. Сорт ИРП-1015 более маслостоек, но менее прочен.

Термостойкие и маслостойкие резины (ИРП-1368, ИРП-2043) с рабочей температурой 250°C перед употреблением должны обезгаживаться в вакууме в течение 24 ч при максимальной рабочей температуре.

Сравнительные характеристики различных вакуумных резин представлены в табл. 11.6.

Таблица 11.6

Свойства вакуумных резин

Характеристики	Марки резины				
	7889	9024	ИРП-1015	ИРП-1368	ИРП-2043
Предел прочности при растяжении, МПа	17	10	9	3	10
Относительное удлинение, %	550	350	400	150	—
Максимальная рабочая температура, °C	70	70	70	250	250
Остаточная деформация после 45% сжатия по высоте при 70 °C в течение 100 ч, %	10	15	15	—	—
Набухание в вазелиновом масле при 70 °C, %	90	6	4,5	18	5
Морозостойкость (хрупкость при ударе), °C	-50	-40	-30	-57	-30
Газопроницаемость воздуха при 20 °C, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{мм} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \times \text{Па}^{-1}$	10^{-8}	$9 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
Уплотняющее давление, МПа	1,6...1,8	2,0...2,2	2,0...2,2	0,4...0,7	—
Удельная скорость газовыделения при максимальной рабочей температуре, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$

Для низковакуумных систем, а также в ремонтных работах, часто используются клеевые соединения. Эпоксидный клей Л-4 применяется для соединения стали, стекла и керамики с рабочей температурой не более 140°C, теряет прочность при длительном воздействии теплой воды. Кремнийорганические клеи ИП-9, КТ-9, ВКТ-3, ВС-10Т могут выдерживать кратковременный нагрев до 300 ... 350°C или длительную работу при 150 ... 180°C.

Для лучшей герметизации разборных низковакуумных соединений между соединяемыми деталями добавляется смазка Рамзая (смесь каучука, вазелинового масла и парафина). Временная ликвидация течей и проверка на герметичность производится с помощью замазки типа пластилина — вакопластом. На основе воска и канифоли изготавливают заливочные массы, плавящиеся при температуре 60 ... 90°C и называемые п и ц е и н о м .

§ 11.2. Вакуумно-герметичная пайка

Большое значение вакуумно-герметичная пайка имеет для вакуумного машиностроения и приборостроения, обеспечивающая изготовление узлов из различных материалов: стали, керамики, стекла, молибдена.

По сравнению со сваркой герметичная пайка металлов позволяет значительно уменьшить температуру разогрева соединяемых металлов. Могут быть спаяны некоторые металлы и сплавы, не дающие герметичных сварных соединений: сталь и латунь, алюминий и никель. Припой должен иметь высокую механическую прочность, пластичность, коррозионную стойкость, смачиваемость и жидкотекучесть при температуре плавления. Это обеспечивает возможность его проникновения в зазоры между соединяемыми деталями.

Зазор в месте спая должен быть во время расплавления в пределах 0,05 ... 0,12 мм для втягивания припоя в зазор силами поверхностного натяжения

$$h = D_{\text{в}} - D_0;$$

$$D_{\text{в}} = D'_{\text{в}}(1 + \alpha_{\text{в}}\Delta t); \quad D_0 = D'_0(1 + \alpha_0\Delta t),$$

где $D'_{\text{в}}$ и D'_0 — диаметры вала и отверстия при комнатной температуре; $\alpha_{\text{в}}$ и α_0 — температурные коэффициенты линейного расширения материалов вала и отверстия.

Температуру плавления припоя выбирают на 100°C больше, чем максимальная температура обезгаживания узла, но на 100°C меньше температуры плавления соединяемых материалов.

По относительной тугоплавкости припоев пайка делится на твердую и мягкую. Припой, плавящийся при температуре ниже 300°C, используются при мягкой пайке, а припой с температурой плавления более 300°C — при твердой. Основные марки, состав и темпера-

тура плавления мягких припоев приведены в табл. 11.7, а твердых — в табл. 11.8.

Таблица 11.7

Химический состав и температура плавления мягких припоев для вакуумно-герметичной пайки

Марки припоя	Химический состав, %						Температура плавления, °С	
	Sn	Pb	Cu	Ag	Sb	Zn	начало	конец
ПОС-30	30	Остальное	0,15	—	2	—	183	256
ПОС-40	40	»	0,10	—	2	—	183	235
ПОС-61	61	»	0,10	—	0,9	—	183	183

Таблица 11.8

Химический состав и температура плавления твердых припоев для вакуумно-герметичной пайки

Марки припоя	Химический состав, %					Температура плавления, °С	
	Cu	Ag	Zn	Au	Si	начало	конец
ПСр-45	30	45	остальное	—	—	660	725
ПСр-72	28	72	—	—	—	779	779
ПЗлМ80	20	—	—	80	—	889	889
ПМК4	96	—	—	—	4	910	1000
Медь МБ	100	—	—	—	—	1083	1083

При производстве узлов вакуумной аппаратуры мягкая пайка может использоваться для элементов с рабочей температурой не более 120°C, а твердая — 450°C.

Для получения герметичных соединений важно, чтобы температурный интервал кристаллизации материала припоя не превышал 50°C. При большем значении припой склонны к ликвации и не обеспечивают герметичного соединения. Этим же недостатком обладают припои с большим количеством растворенных газов и органических включений. Такие припои выкипают при плавке в вакууме, и швы получают пористыми.

Пайка может осуществляться на воздухе и в защитной среде. При пайке на воздухе для защиты поверхностей от окисления применяются флюсы. Для мягкой пайки флюсом является смесь равных долей $ZnCl_2$ и HCl или раствор канифоли в спирте. Твердая пайка нержавеющей стали осуществляется с флюсом, содержащим 40% фтористого калия и 60% борной кислоты. Для твердой пайки конструкционных сталей, меди, латуни, бронзы в качестве флюса может применяться обезвоженная бура.

Детали не загрязняются флюсами и обезгаживаются во время пайки в защитной среде — водороде или вакууме.

Вакуумно-водородные печи для пайки обеспечивают максимальную температуру рабочего пространства 1150 °С. Пайка в водороде меди марок М1, М2, М3 из-за «водородной болезни» не производится, а пайка деталей из нержавеющей стали возможна в водороде, осушенном до точки росы не выше —60 °С, из-за опасности образования на поверхности устойчивых оксидов хрома.

Для получения герметичных спаев большое значение имеет равномерность нагрева и охлаждения сборочного узла.

Детали при сварке должны быть собраны и установлены в приспособления, обеспечивающие их взаимную неподвижность при пайке. Паяные соединения не обеспечивают высокой механической прочности на растяжение. При напряжениях 2,5 МПа соединение деталей из стали 20 с припоем ПОС-40 разрушается через 5000 ч, а при напряжениях 9,4 МПа — через 85 ч. Предел прочности твердых припоев 200 ... 400 МПа. Наиболее надежны в отношении прочности паяные соединения, работающие на срез.

Рациональные и нерациональные формы стыковых и угловых паяных соединений показаны на рис. 11.1, а, б.

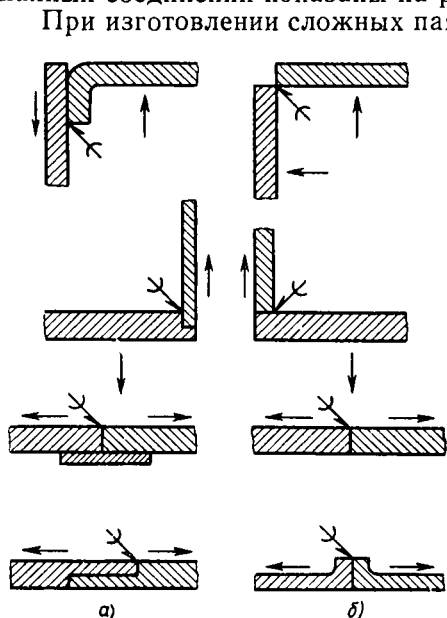


Рис. 11.1. Стыковые и угловые паяные соединения:

а — рациональные конструкции; б — нерациональные конструкции

При изготовлении сложных паяных узлов, имеющих большое количество спаев, которые могут быть спаяны в водородно-вакуумной печи, за один разогрев всего узла припой диаметром 1 или 1,5 мм закладывается перед пайкой в специальные внутренние канавки (рис. 11.2). Большие трудности встречаются при изготов-

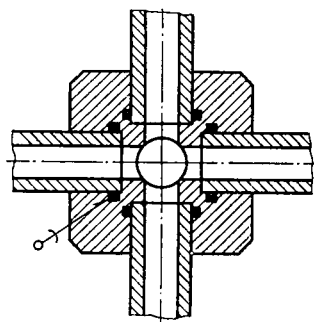


Рис. 11.2. Вакуумный элемент с несколькими паяными соединениями, выполняемые одновременно в вакуумно-водородной печи

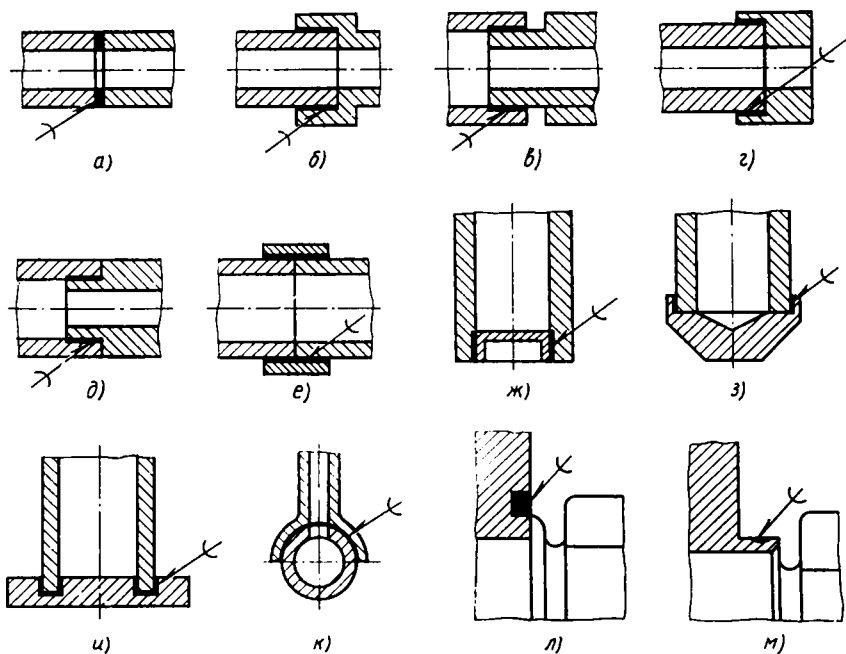


Рис. 11.3. Конструкция вакуумных паяных соединений:

а, б, в, г, д, е — соединения труб; ж, з и — заглушек, фланцев и днищ;
к — патрубков; л, м — сильфонов с фланцами

лении сложных паяных узлов, которые не могут быть выполнены за один разогрев всего узла. В этом случае применяются припои с различной температурой плавления.

Примеры паяных соединений труб, фланцев, заглушек, днищ, сильфонов показаны на рис. 11.3, а... м.

В элементах конструкций вакуумных машин и приборов часто приходится соединять между собой металл со стеклом или с керамикой. Герметичный спай металла со стеклом образуется только в том случае, когда на поверхности спаиваемого со стеклом металла имеется тонкий, но плотный слой оксидов. Оксиды металлов, как и стекло, имеют ионную структуру и, хорошо растворяясь в стекле, образуют вакуумно-плотное соединение.

Спай стекла с металлом могут быть трех видов: согласованные, несогласованные и с металлическим припоем.

В *согласованных* спаих (рис. 11.4, а... и) стекло и металл имеют близкие коэффициенты линейного расширения во всем диапазоне рабочих температур. Большая часть сортов технического стекла имеет коэффициент линейного расширения $(3 \dots 10) \cdot 10^{-6}$. Коэффициент линейного расширения металлов и сплавов изменяется от $4,4 \cdot 10^{-6}$ (для вольфрама) до $17,8 \cdot 10^{-6}$ (для меди). Напряжения,

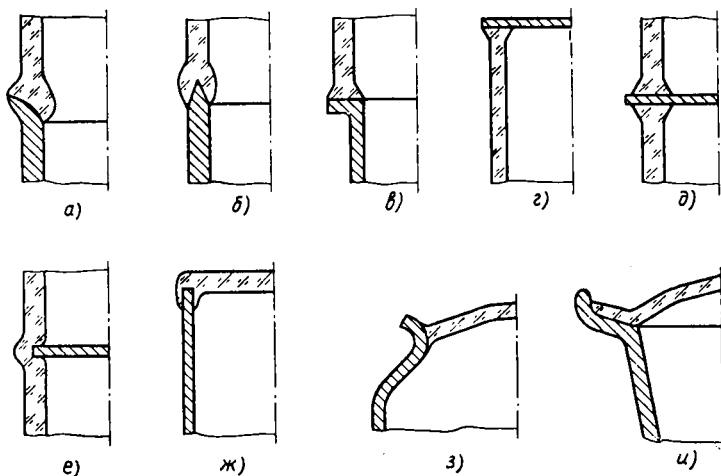


Рис. 11.4. Согласованные спаи металла со стеклом:
 а, б, в — трубчатые спаи; г, д, е — дисковые спаи; ж, з, и — окошечные спаи

возникающие в согласованных спаях при их охлаждении от температуры размягчения стекла до комнатной температуры, меньше предела прочности любого из соединяемых материалов. Так как добиться полного совпадения температурных зависимостей коэффициентов линейного расширения для обоих соединяемых материалов нельзя, то стремятся к тому, чтобы они совпадали при комнатной температуре и температуре отжига (на 50°C ниже температуры размягчения стекла).

В несогласованных спаях коэффициенты линейного расширения соединяемых материалов могут значительно отличаться друг от друга, а опасные напряжения, которые должны были бы образоваться в этих условиях, предотвращаются применением конструкций с гибким элементом, металлов небольшого диаметра, металлов с невысоким пределом текучести, переходных согласованных спаев и конструкций, в которых используется повышенная прочность стекла на сжатие. На рис. 11.5, а... е приведены примеры несогласованных спаев. В конструкциях рис. 11.5, а, б, г используют заостренный конец трубы в качестве гибкого элемента, на рис. 11.5, в ту же роль выполняет тонкая цилиндрическая оболочка, в конструкциях рис. 11.5, в, д, е используется повышенная прочность стекла на сжатие. Коэффициент линейного расширения металла в этих спаях должен быть больше, чем у стекла. При охлаждении тонкой конструкции в стекле возникают внутренние сжимающие напряжения.

В спаях с металлическим припоем на поверхность стекла путем обмазки с последующим обжигом наносится слой серебра, который облуживается обычным способом, и к нему припаивается медная

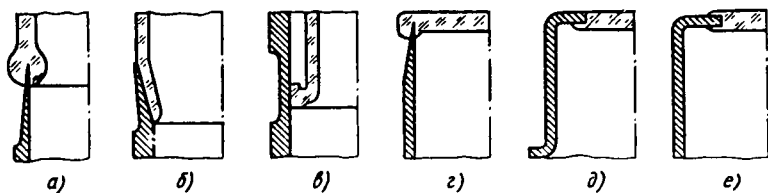


Рис. 11.5. Несогласованные спай металла со стеклом:
а, б, в — трубчатые спай; *г, д, е* — окошечные спай

головка. Такой спай представляет собой металлическую втулку и стеклянную трубку, в зазор между которыми залит легкоплавкий припой, хорошо смачивающий металл и стекло и компенсирующий их температурные деформации. Изготовленный таким образом металлостеклянный узел соединяется пайкой с другими металлическими деталями.

Спай керамики с металлами широко применяются в элементах сверхвысоковакуумных систем, так как имеют более высокую термостойкость, чем спай стекла с металлом. Их обычно изготавливают с применением активных припоев, образующих в процессе плавления химические соединения с керамикой. На рис. 11.6 показаны примеры конструктивных элементов, в которых используются спай керамики и металла.

Спай керамики со стеклом могут быть получены при непосредственном соединении спаиваемых материалов.

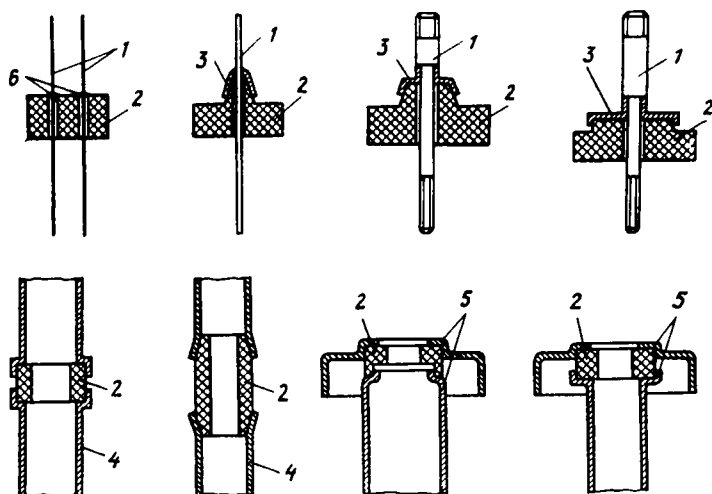


Рис. 11.6. Спай металла с керамикой:

1 — металлический стержень; *2* — керамическое кольцо; *3* — металлический стакан (ковар, никель); *4* — втулка (ковар, никель); *5* — кольцо (никель); *6* — припой

§ 11.3. Сварные герметичные соединения

Для герметичного соединения деталей в вакуумной технике могут применяться следующие виды сварок: а) газовая ацетиленовая; б) электродуговая; в) газодуговая в защитной среде; г) холодная методом пластической деформации; д) диффузионная в вакууме и сварка трением; е) электронно-лучевая.

Газовая ацетиленовая сварка применяется для малоуглеродистых сталей с толщиной стенки в месте сварки не более 2 мм. Герметичные соединения получают при сварке с отбортовкой; стыковая сварка деталей сверхвысоковакуумных систем не рекомендуется.

Электродуговая сварка может применяться для соединения деталей низковакуумных систем с толщиной стенки более 2 мм. Лучшие результаты можно получить при автоматической сварке под слоем флюса. Для сверхвысоковакуумных систем она не рекомендуется из-за недостаточной герметичности.

Газодуговая сварка в защитной среде с плавящимся и неплавящимся электродом для соединения различных металлов может применяться для всех типов вакуумных систем. Нержавеющая сталь, медь, алюминий при толщинах в месте сварки 0,1 до 2 мм свариваются в среде аргона или гелия вольфрамовым неплавящимся электродом. Лучшие результаты получаются при автоматической сварке в камерах, в которых после откачки воздуха напускается инертный газ.

Холодная сварка методом пластической деформации применяется для соединения небольших деталей из пластичных материалов (медь, алюминий). Требуется сложное прессовое оборудование.

Диффузионная сварка в вакууме и сварка трением применяется для соединения разнородных материалов: меди и керамики и т. д.

Электронно-лучевая сварка применяется для соединения химически активных и тугоплавких материалов, ответственных узлов из стали, меди и алюминиевых сплавов. Сварка ведется в вакуумных камерах при давлении не более 10^{-3} Па.

Ко всем видам вакуумно-герметичной сварки предъявляются специальные требования.

1. Для получения герметичных соединений сварка должна вестись с постоянной скоростью; перерывы и подварки часто служат местом появления микротрещин, создающих течи.

2. Сварку желательно вести со стороны, обращенной в процессе эксплуатации в вакуум, для уменьшения количества щелей, карманов и неровностей тыльной стороны шва.

3. Допускается вогнутый шов в стыковых и угловых соединениях, получающийся при сварке без присадочного материала.

4. После изготовления сварные швы обязательно должны проверяться на герметичность с помощью вакуумных течеискателей.

К конструкции и технологии обработки деталей, которые подготавливаются к сварке, предъявляются дополнительные требования.

а) детали перед сваркой тщательно очищаются и обезжириваются; б) сопряжения между свариваемыми деталями должны выполняться по скользящей посадке.

Детали для угловых швов можно подготавливать согласно одному из вариантов, показанных на рис. 11.7, а...в. Вариант рис. 11.7, а рекомендует для некруглых, а вариант рис. 11.7, б — для круглых деталей. Соединение тонкостенной трубы с толстой плитой показано на рис. 11.7, в. Особенностью этой сварки является дополнительное кольцо, выравнивающее толщины свариваемых деталей. Без этого кольца сварка невозможна из-за оплавления тонкостенной детали.

Сварка фланца с обечайкой может быть выполнена различными способами, показанными на рис. 11.8, а...в. Во всех случаях фланцы не требуют припуска на дополнительную обработку после сварки, так как соединяются одинаковые по толщине тонкостенные элементы, а массивный фланец не успевает даже нагреться за время сварки.

Сильфоны из нержавеющей стали, широко применяемые в высоковакуумной технике, могут иметь толщину стенки от 0,05 до 0,25 мм. Соединения сильфонов при сварке с трубами, фланцами и валами показано на рис. 11.9.

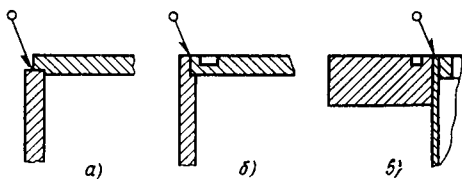


Рис. 11.7. Конструкции угловых сварных соединений:

а — без отбортовки; б — с отбортовкой; в — соединение деталей разной толщины

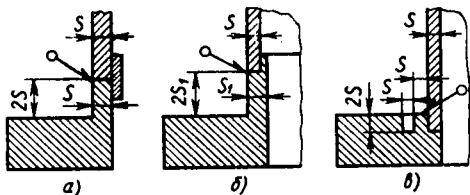


Рис. 11.8. Сварка фланцев с обечайкой:

а — с подкладкой; б — без подкладки; в — с проточкой во фланце

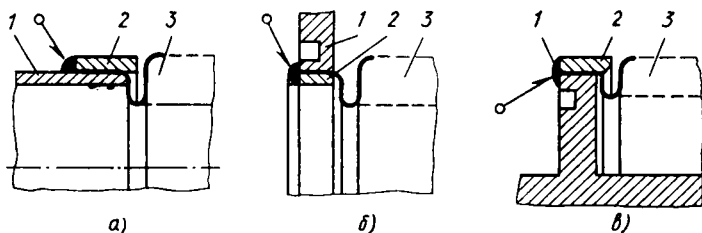


Рис. 11.9. Сварка сильфонов:

а — с трубой; 1 — труба; 2 — охрannое кольцо; 3 — сильфон; б — с фланцем; 1 — фланец; 2 — охрannое кольцо; 3 — сильфон; в — с валом; 1 — вал; 2 — охрannое кольцо; 3 — сильфон

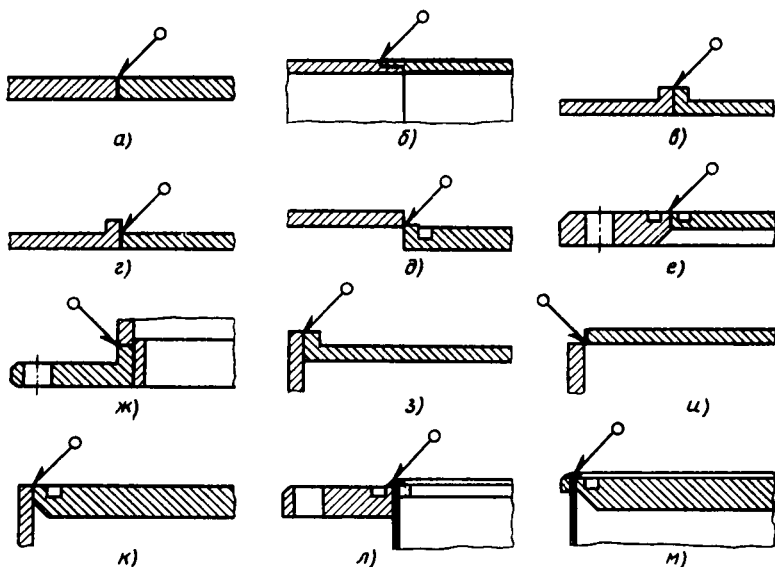


Рис. 11.10. Примеры конструкций вакуумных сварных соединений:
а — стыковые без отбортовки для плоских деталей; *б* — стыковые без отбортовки для цилиндрических деталей; *в*—*ж* — стыковые с отбортовкой для плоских деталей; *з*, *к* — угловые с отбортовкой для плоских деталей; *и* — угловое без отбортовки для плоских деталей; *л* — соединение фланца с тонкостенной оболочкой; *м* — соединение дна с тонкостенной оболочкой

Примеры конструкций плоских, цилиндрических и угловых сварных вакуумных соединений с отбортовкой и без нее показаны на рис. 11.10.

§ 11.4. Разборные вакуумные соединения

В разборных вакуумных соединениях необходимо обеспечить герметичность стыка двух соединяемых деталей, близкую к герметичности сплошного материала. В месте соприкосновения двух деталей в результате механической обработки всегда остаются микронеровности, которые затрудняют получение вакуумно-герметичного соединения.

Герметичность может быть достигнута значительно легче, если в зазор между соединяемыми материалами поместить уплотнитель, вязкость которого достаточна для заполнения неровностей при контактных напряжениях, значительно меньших предела упругости основных соединяемых материалов. Для заполнения или изоляции микронеровностей можно использовать пластическую деформацию хотя бы одного из двух соединяемых материалов.

В качестве уплотнителей могут применяться смазки, резины, фторопласт, металлы.

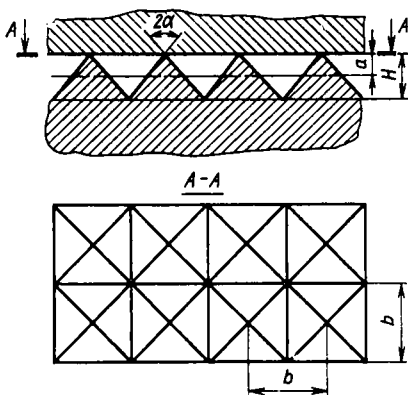


Рис. 11.11. Расчетная модель герметизируемых поверхностей

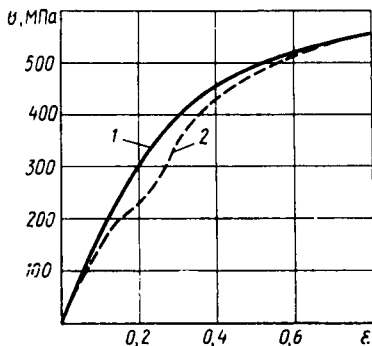


Рис. 11.12. Контактное напряжение при деформации пирамиды, имеющей в основании квадрат и угол при вершине 150° :

1 — расчетная; 2 — экспериментальная кривая

Определим усилие деформации микровыступов, необходимое для обеспечения заданного значения натекания. Сделаем следующие допущения: 1) герметизируемая поверхность идеально гладкая; 2) микровыступы уплотнителя имеют форму пирамиды с углом при вершине $2\alpha = 150^\circ$, а в основании пирамиды лежит квадрат (рис. 11.11); 3) высота микровыступов постоянна и равна H ; 4) возможность появления узких и глубоких рисок мала; 5) основания микровыступов лежат в одной плоскости.

В процессе деформации микровыступов наблюдается их упрочнение вследствие пластической деформации, поэтому зависимость между напряжениями и деформациями в поверхностном слое запишем в виде степенной функции:

$$\sigma = \sigma_s (\epsilon/\epsilon_s)^n = B\epsilon^n;$$

здесь

$$B = \sigma_s / \epsilon_s^n = E \epsilon_s^{1-n}, \quad (11.1)$$

где ϵ — обобщенная относительная деформация микровыступов; σ — напряжение в зоне контакта; σ_s — предел текучести материала уплотнителя; ϵ_s — относительная деформация микровыступа, соответствующая напряжению σ_s ; n — показатель степени ($0 \leq n \leq 1$); для идеально пластичных материалов $n=0$, а для идеально упругих $n=1$; E — модуль упругости материала уплотнителя.

На рис. 11.12 приведена зависимость контактных напряжений от относительной деформации высоты квадратных пирамид с углом при вершине 150° для образцов из отожженной меди МБ. Кривая 2

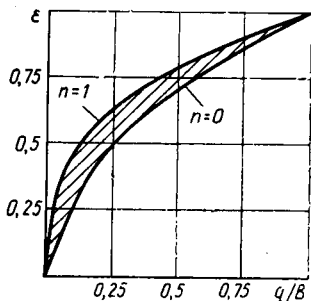


Рис. 11.13. Зависимость относительной деформации микровыступов от удельного давления для абсолютно упругого материала уплотнителя ($n=1$) и идеально пластичного ($n=0$)

получена экспериментально, а кривая $n=1$ получена по формуле (11.1) при $B=580$ МПа и $n=0,29$.

Контактные напряжения для выбранной модели уплотнения при воздействии удельного давления q определяют по формуле

$$\sigma = q/\varepsilon^2, \quad (11.2)$$

где $\varepsilon = a/H$ (a — сближение контактируемых поверхностей).

Решая совместно (11.1) и (11.2), найдем связь между удельным давлением и относительной деформацией микровыступов:

$$\varepsilon = (q/B)^{\frac{1}{n+2}}. \quad (11.3)$$

Зависимость относительной деформации микровыступов от удельного давления, согласно (11.3), для абсолютно упругого и идеально пластичного материалов уплотнителя показана на рис. 11.13.

Подсчет проводимости элементарной канавки $b \times b$ (см. рис. 11.11) в молекулярном режиме течения по уравнению Кнудсена (3.64) дает следующее выражение при $\varepsilon \rightarrow 1$:

$$U_b = 0,22v_{ap}H^2(1-\varepsilon)^3. \quad (11.4)$$

Сделав дополнительное допущение об отсутствии волнистости поверхности реальных уплотнений, имеющих длину l и ширину h , можно определить общую проводимость параллельно и последовательно соединенных элементарных канавок:

$$U_0 = \frac{l}{h} U_b. \quad (11.5)$$

Подставляя в (11.5) выражение для U_b из (11.4) и для ε из (11.3), получим уравнение для определения проводимости идеализированного стыка гладкой и шероховатой поверхностей при молекулярном режиме течения газа:

$$U_0 = \frac{0,22v_{ap}H^2l}{h} \left[1 - \left(\frac{q}{B} \right)^{\frac{1}{n+2}} \right]^3. \quad (11.6)$$

Поток газа через уплотнение, отнесенный к единице его длины,

$$Q_1 = U_0 \Delta p = K_r K_\phi K_c, \quad (11.7)$$

где K_r , K_ϕ , K_c — факторы газа, формы и силы:

$$K_r = \Delta p v_{ap}; \quad K_\phi = 0,22H^2/h; \quad K_c = \left[1 - \left(\frac{q}{B} \right)^{\frac{1}{n+2}} \right]^3.$$

Из выражения (11.7) легко рассчитать удельное давление, которое необходимо создать, чтобы получить заданное значение удельного натекания Q_1 :

$$q = B \left[1 - \left(\frac{Q_1}{K_r K_\phi} \right)^3 \right]^{\frac{1}{n+2}}. \quad (11.8)$$

Для сравнения эффективности различных уплотнений обычно пользуются не удельным давлением, а силой, приходящейся на единицу длины уплотнения:

$$F = qh = Bh \left[1 - \left(\frac{Q_1}{K_r K_\phi} \right)^3 \right]^{\frac{1}{n+2}}. \quad (11.9)$$

Из последней формулы легко заметить, что полная герметичность соединения по данной модели наступает, когда $F = Bh$. В реальных уплотнениях за счет глубоких рисок практически невозможно добиться полной герметичности.

К разборным вакуумным соединениям предъявляются следующие требования: минимальное натекание и газовыделение; механическая прочность; термическая стойкость — способность выдерживать многократные прогревы без нарушений герметичности; коррозионная стойкость; максимальное число циклов разборки и сборки с сохранением герметичности; удобство ремонта и технологичность в изготовлении; возможность легкой проверки на герметичность.

В вакуумной технике в системах с температурой прогрева до 300°C широко применяются резиновые уплотнители. Резина обладает хорошими упругими свойствами, и для создания вакуумно-герметичного соединения со стальной поверхностью с $RA = 10$ мкм требуются небольшие усилия. Для прокладок шириной 4 мм удельное усилие уплотнения 4...8 Н/мм, что соответствует удельным давлением 1..2 МПа. Резиновые уплотнения допускают практически неограниченное число разборок иборок, просты в изготовлении, редко нуждаются в ремонте. Недостатком резиновых уплотнений является повышенное газовыделение и газопроницаемость по сравнению с материалом уплотняемых деталей.

Форма уплотнителя круглая или квадратная, диаметр или сторону квадрата которого из конструктивных соображений выбирают 3...5 мм.

Соединение на рис. 11.14, а между двумя плоскими фланцами — самое простое в изготовлении и ремонте, но оно не обеспечивает точной фиксации уплотняемых деталей. В нем не ограничивается максимальное усилие на прокладку, что может привести при неправильной сборке к большим перегрузкам прокладки, сопровождающимся ее пластической деформацией. Для фиксации соединяемых деталей и ограничения уплотняющего усилия могут использоваться дополнительные конструктивные элементы. Основные размеры

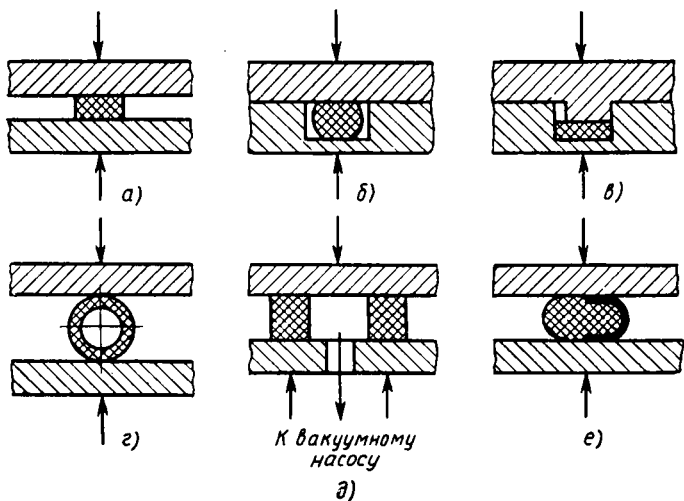


Рис. 11.14. Конструктивные схемы разборных вакуумных соединений с полимерными уплотнителями

фланцевого соединения с резиновыми прокладками показаны на рис. 11.15 и приведены в табл. 11.9.

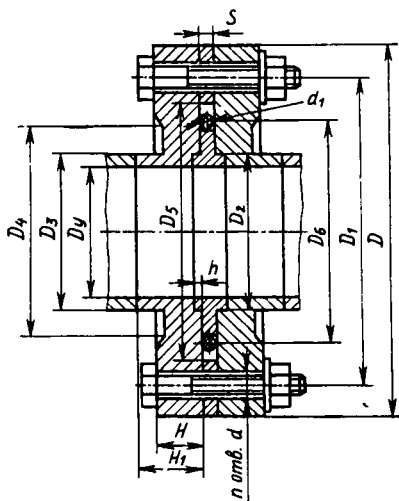


Рис. 11.15. Конструкция разборного соединения с симметричными фланцами и резиновыми прокладками

Соединение на рис. 11.14, б ограничивает максимальное усилие сжатия прокладки и обеспечивает осевую фиксацию за счет соприкосновения соединяемых деталей. Форма уплотнителя для сое

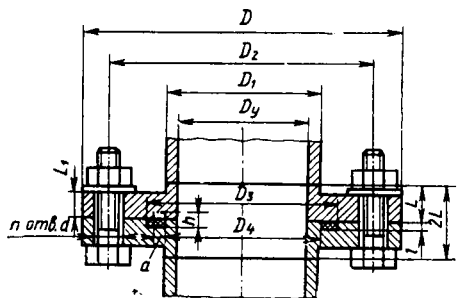


Рис. 11.16. Конструкции разборного соединения с несимметричными фланцами и резиновыми прокладками

динений (рис. 11.14, а, б) может быть как круглая, так и квадратная. Основные размеры соединения показаны на рис. 11.16 и в табл. 11.10.

Соединения на рис. 11.14, а, б используются очень часто в различной вакуумной аппаратуре. Для создания необходимого усилия герметизации степень деформации прокладки составляет 30%.

Соединение на рис. 11.14, г с подачей повышенного давления внутрь уплотнителя рекомендуется для уплотнения фланцев очень большого диаметра. Оно имеет повышенную деформацию уплотни-

Таблица 11.9

Основные размеры фланцевых соединений с резиновым уплотнителем (рис. 11.15)

D_y	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	H	H_1	h	d	n	S	d_1
10	55	40	12,2	14	22		19							
16	60	45	18,2	20	28	—	23	8	11		6,6		—	
25	70	55	27,2	30	38		33			2,5		4		5,0
40	100	80	42,2	45	53		47							
63	130	110	66,0	70	78	96	80	12	14		9	8	3,9	
100	165	145	103	110	118	128	110							
160	225	200	—	170	178	180	166	16	17	—	11	12	4,8	6,0
250	335	310	255	260	268	290	268			4,5		16	6,4	8,0
400	510	480	405	410	418	450	408	20	21		14	16		

Таблица 11.10

Основные размеры соединений с резиновым уплотнителем (рис. 11.16)

D_y	D	D_1	D_2	D_3	D_4	L	L_1	l	d	n	a	h
10	46	14	34	22,5	13,5	10	5		6		3	2
15	52	19	39	27,5	18,5			1,8				
20	62	24	48	32,5	23,5	11	6				4	
25	70	30	55	38,0	29,0				7			
32	78	37	62	45,0	36,0	13	8			4		
50	111	56	90	69,0	55,0							3,5
60	120	66	102	79,0	65,0				9			
80	145	86	125	100	86,0	15	10	3,0				
100	170	106	145	120	106				12		5	
125	195	131	170	146	132							
160	235	166	210	188	168							
200	275	206	250	228	208	17	12					
260	340	266	308	288	268				14			
300	380	306	350	328	308	19	14	4,2		8		5
400	490	407	455	430	410	21	16		16			
500	600	508	565	530	510	25	20		18		6	

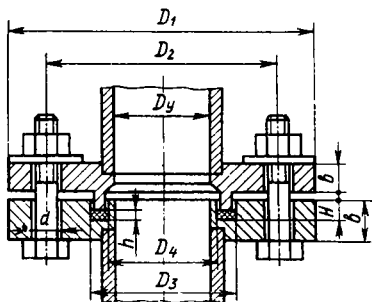


Рис. 11.17. Конструкция соединения с несимметричными фланцами и фторопластовым уплотнителем

тельного элемента и способно компенсировать волнистость уплотняющей поверхности фланцев.

Соединение на рис. 11.14, *д* имеет двойное уплотнение с промежуточной откачкой. Оно значительно сложнее других соединений с резиновыми прокладками, но обеспечивает повышенную надежность и уменьшение газопроницаемости соединения.

Соединение на рис. 11.14, *е* отличается армировкой уплотнительного элемента со стороны вакуума металлической фольгой, что обеспечивает снижение газовыделения и газопроницаемости соединения за счет уменьшения реальной поверхности соприкосновения уплотнителя с вакуумом.

Вместо резины в качестве уплотнителя применяют фторопласт, имеющий меньшее газовыделение и газопроницаемость. Недостатком фторопласта является очень низкий предел упругости, поэтому

Таблица 11.11

Основные размеры соединений с фторопластовым уплотнителем (рис. 11.17)

D_y	D_1	D_2	D_3	D_4	b	H	Число бол- тов n	d	h
10	46	34	19,5	13,5	8	4	4	6	2
15	52	39	24,5	18,5	10				
20	62	48	31,5	23,5					
25	70	55	37	29					
32	78	62	44	36	12	6	9	3,5	
40	85	70	52	44					
50	110	90	70	55					
60	120	102	80	70					
80	145	125	100	90	14	8	8	14	
100	170	145	120	110					
125	195	170	145	135					
160	235	210	180	170					
200	275	250	220	210	18	8	18	5	
260	340	308	280	270					
300	380	350	320	310					
380	460	430	400	390					
500	600	565	525	515	24	8	18	5	
600	700	665	625	615					
700	800	765	725	715					

для уплотнения фторопластом необходимо создавать напряженное состояние всестороннего сжатия. Наилучшим образом этому соответствует конструктивная схема, изображенная на рис. 11.14, в. Она обеспечивает ограничение усилия, действующего на прокладку, и фиксирует соединяемые детали как в осевом, так и в радиальном направлении. Форма уплотнителя квадратная. В зазор 0,1 мм фторопласт не вытекает даже при очень больших удельных нагрузках. Основные размеры соединения с несимметричными фланцами и фторопластовым уплотнителем показаны на рис. 11.17 и в табл. 11.11.

Для техники сверхвысокого вакуума большое значение имеют металлические уплотнения, допускающие прогрев до температуры 450...500 °С. Заполнение микронеровностей происходит за счет пластической деформации материала прокладки. Текучесть металлов значительно меньше, чем у резины, и поэтому для создания уплотнения требуются значительно большие удельные давления и более высокий класс чистоты поверхности. Газовыделение металлических прокладок в 10^3 раз меньше, чем резиновых, но соединение с металлическими прокладками сложнее в изготовлении, допускает ограниченное число прогревов и сборок. Схемы наиболее распространенных металлических уплотнений показаны на рис. 11.18, а...ж.

Соединения с круглым уплотнителем (рис. 11.18, а) наиболее просты в изготовлении, ремонте и надежно работают с прокладками из меди и золота. Усилие

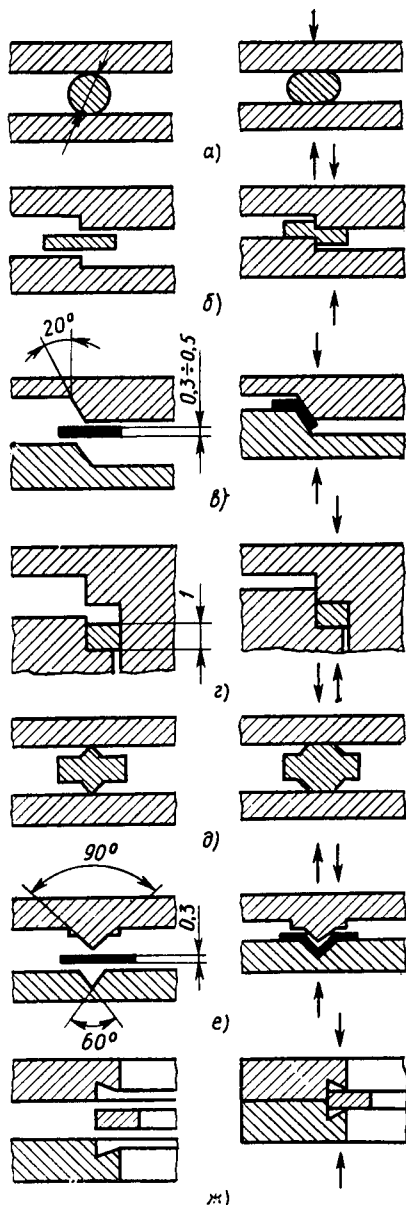


Рис. 11.18. Схемы уплотнений с металлическими прокладками:

а — проволоочной прокладкой; б — с плоской прокладкой, работающей на срез; в — конусное; г — со всесторонним сжатием; д — ножовое; е — канавочно-клиновое; ж — «конфлат»

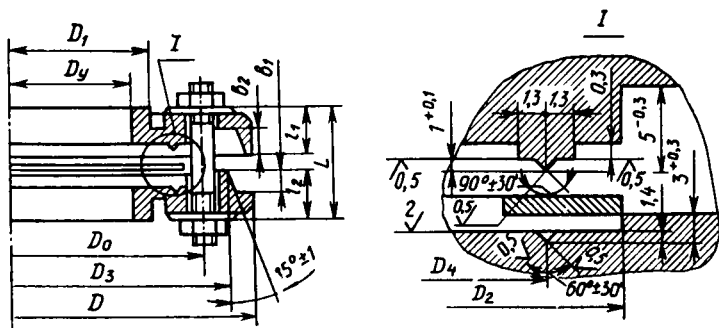


Рис. 11.19. Конструкция канавочно-клинового соединения

герметизации в таких соединениях с золотой проволокой $\varnothing 0,8$ мм составляет 350 Н/мм.

Усилие герметизации в уплотнении (рис. 11.18, б) очень чувствительно к соосности режущих кромок. Для прокладок толщиной 4 мм минимальное усилие герметизации для неотожженной меди 470 Н/мм, а для алюминия — 340 Н/мм.

Конусное соединение (рис. 11.18, в) по сравнению с плоским требует несколько меньшего усилия герметизации, но имеет большие габариты и плохо работает при неравномерных прогревах, сопровождающихся появлением зазора при радиальном градиенте температуры.

Уплотнение со всесторонним сжатием (рис. 11.18, г) плохо разбирается из-за проникновения материала прокладки в зазоры между сопрягающимися деталями.

Ножевое уплотнение (рис. 11.18, д) имеет наименьшее среди металлических уплотнений усилие герметизации и может применяться вместо резиновых уплотнителей, отличается увеличением усилия герметизации при повторных сборках.

Канавочно-клиновое соединение (рис. 11.18, е) с медной плоской прокладкой толщиной 0,5 мм имеет усилие герметизации 280 Н/мм. Основные размеры этого соединения показаны на рис. 11.19 и в табл. 11.12.

Уплотнение типа «конфлат» (рис. 11.18, ж) широко применяется для прогреваемых сверхвысоковакуумных систем. Фланцевое соединение с этим уплотнением показано на рис. 11.20, а основные размеры даны в табл. 11.13.

При прогреве разборных соединений до 450...500°C, для того чтобы не произошло разгерметизации после охлаждения, необходимо постоянство коэффициентов линейного расширения всех входящих в соединение материалов во всем рабочем диапазоне температур.

Медь и нержавеющая сталь имеют близкие коэффициенты линейного расширения, поэтому медь широко применяется в качестве

Основные размеры соединения с плоской металлической прокладкой
и канавочно-клиновым уплотняющим профилем (рис. 11.19)

D_y	D	D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	b_1	b_2	l_1	l_2	L	Число болтов	Резьба	Толщина уплотнителя
10	58	40	15	20	52	15			26	10	35	4	M8×1	0,5
15	65	45	20	25	60	20			26	10	35	4	M8×1	
20	78	55	25	30	75	25			26	12	37	4	M10×1,25	
25	85	62	30	35	80	30			26	12	37	4	M10×1,25	
32	92	70	37	45	86	40			26	12	37	4	M10×1,25	
50	120	90	56	60	115	55			27	14	39	8	M12×1,25	
60	130	100	66	70	125	65	7	8	27	14	40	8	M12×1,25	
80	175	128	86	110	165	105			18	18	31	12	M12×1,25	
100	200	148	106	130	190	125			18	18	31	12	M12×1,25	
125	225	175	132	150	215	150			20	20	33	12	M14×1,5	
160	280	215	168	195	270	190			21	21	34	16	M14×1,5	
200	320	255	208	235	308	230			21	21	35	20	M14×1,5	
260	420	342	268	320	410	310			19	19	31	28	M16×1,5	
300	475	382	308	360	465	350			19	19	31	32	M16×1,5	
380	560	462	388	440	550	430			21	21	34	36	M16×1,5	
500	680	588	508	565	670	555	8	9	23	23	38	48	M16×1,5	
600	800	698	610	672	790	662			25	25	42	52	M18×1,5	
700	900	798	710	772	890	762			25	25	42	60	M18×1,5	

материала прокладки между деталями из нержавеющей стали. Для повышения надежности уплотнения используют покрытие золотом медных прокладок. Это предотвращает коррозию прокладок при частых прогревах до 450 ... 500°C.

Для компенсации небольших отличий коэффициентов линейного расширения могут использоваться упругие прокладки, тонкие болты, тарельчатые пружины и шайбы, ослабляющие проточки во фланцах и т. д. (рис. 11.21).

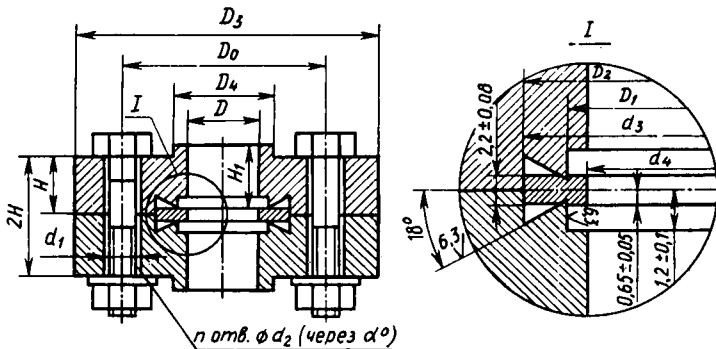


Рис. 11.20. Конструкция соединения типа «конфлат»

D_y	$\frac{D}{H_{11}}$	D_o	$D_1 \pm 0,1$	$D_2 \begin{smallmatrix} I \\ S \\ 9 \end{smallmatrix}$	$D_3 \begin{smallmatrix} h \\ 11 \end{smallmatrix}$	$D_4 \begin{smallmatrix} h \\ 11 \end{smallmatrix}$	$H \begin{smallmatrix} h \\ 11 \end{smallmatrix}$	$H_1 \begin{smallmatrix} h \\ 11 \end{smallmatrix}$
16	16,0	27,0	18,3	21,4	34	18,5	8	13,0
40	35,0	58,7	41,8	48,3	70	38,5	13	18,0
50	59,0	92,1	77,0	82,0	144	66,5	18	23,0
100	100,4	130,2	115,2	120,7	152	104,5	21	26,0
160	150,0	181,0	166,0	171,5	202	160,6	22	27,0
200	200,0	231,8	216,8	222,3	253	206,0	25	30,0
250	250,0	282,6	267,5	273,0	305	256,0		

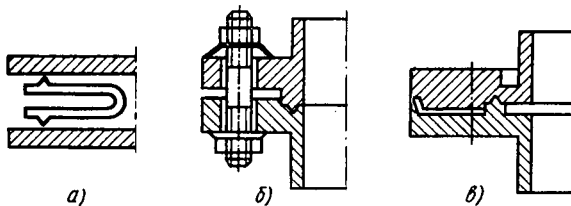


Рис. 11.21. Упругие элементы разборных соединений для компенсации температурных деформаций:
 а — упругая прокладка; б — упругие болты; в — упругие фланцы

§ 11.5. Вакуумные трубопроводы

Элементы вакуумных систем размещаются в машинах и установках в соответствии с требованиями технологического процесса, удобства эксплуатации, ремонта и т. д. Связь между ними осуществляется с помощью соединительных элементов — трубопроводов.

Номинальный диаметр отверстия в трубе называется условным проходным диаметром и обозначается D_y . Размеры рекомендуемых условных диаметров даны в § 9.9.

Трубопроводы могут быть гибкими или жесткими. Гибкие сложнее жестких и применяются для соединения элементов, не имеющих

гиба «конфлат» (рис. 11.20)

d_1	d_2 H13	Уплотнение (медь)		n	α
		d_3	d_4		
М 4	4,4	$21,2 \pm 0,05$	$16,0 \pm 0,2$	6	60°
М 6	6,6	$48,1 \pm 0,05$	$36,8 \pm 0,3$	6	60°
М 8	8,4	$82,4 \pm 0,05$	$63,6 \pm 0,3$	8	45°
		$120,5^{+0,05}_{-0,10}$	$101,7 \pm 0,3$	16	$22^\circ 30'$
		$171,3^{+0,05}_{-0,10}$	$152,5 \pm 0,5$	20	18°
		$221,1^{+0,05}_{-0,10}$	$203,4 \pm 0,5$	24	15°
		$272,8^{+0,05}_{-0,10}$	$254,0 \pm 0,5$	32	$11^\circ 15'$

общей конструкционной базы. Допуск на их установку в этом случае достигает нескольких миллиметров.

Конструктивные формы трубопроводов показаны на рис. 11.22. Длина трубопровода обычно назначается из конструктивных соображений, связанных с удобством размещения элементов в каркасе вакуумной установки. Диаметр трубопровода определяют при проектировочном расчете исходя из требований к его проводимости.

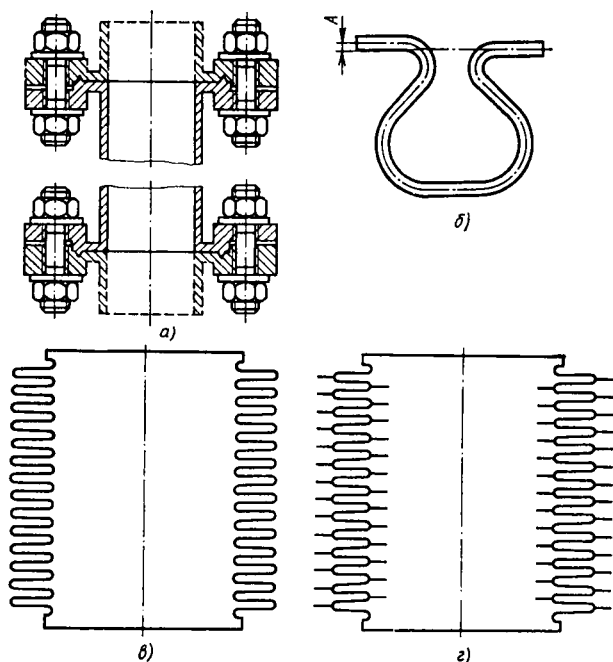
Вакуумные трубопроводы должны выдерживать атмосферное давление без разрушения или потери устойчивости.

Толщину S стенок трубопровода из условия его прочности для тонких стенок $S/D_y < 0,05$ определяют по формуле

$$S = \frac{p_{\text{атм}} D_y}{2\sigma_{\text{топ}}} + C, \quad (11.10)$$

где $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление; C — прибавка на коррозию и технологический допуск; $\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение.

Допускаемое напряжение принимается равным наименьшему из трех значений: $\frac{\sigma_{\text{в}}^t}{2,6}$; $\frac{\sigma_{\text{т}}^t}{1,5}$; $\frac{\sigma_{\text{дп}}^t}{1,5}$, где $\sigma_{\text{в}}^t$, $\sigma_{\text{т}}^t$, $\sigma_{\text{дп}}^t$ — соответственно предел прочности, условный предел текучести, условный предел длительной прочности материала труб при их рабочей температуре.



Р и с. 11.22. Конструктивные формы трубопроводов:
 а — жесткий трубопровод; б — изогнутый трубопровод; в — силфон гидроформованный; г — силфон мембранный сварной

Величина прибавки S колеблется в пределах $(0,05 \dots 0,18) S$. Если в результате расчета S по формуле (11.10) окажется, что $S/D_y \geq 0,05$, то расчет следует уточнить по формулам, справедливым для толстостенных цилиндров. Распределение касательных σ_T и нормальных σ_n напряжений толстостенной трубе может быть определено по формулам

$$\sigma_T = \frac{p_2 r_2^2 - p_1 r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} + \frac{(p_2 - p_1) r_1^2 r_2^2}{r^2 (r_1^2 - r_2^2)}; \quad (11.11)$$

$$\sigma_n = \frac{p_2 r_2^2 - p_1 r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} - \frac{(p_2 - p_1) r_1^2 r_2^2}{r^2 (r_1^2 - r_2^2)},$$

где p_1 и p_2 — давления на наружной и внутренней стороне цилиндра; r_1 и r_2 — радиусы наружной и внутренней поверхностей цилиндра; r — текущее значение радиуса цилиндра.

Если $p_2 = 0$, то наиболее опасным является напряженное состоя-

ние внешних волокон трубы. Главные напряжения при $r=r_1$:

$$\sigma_1 = \sigma_t = -\frac{2p_1 r_1^2}{r_1^2 - r_2^2}; \quad \sigma_2 = \sigma_n = -p_1;$$

$$\sigma_3 = -\frac{p_1 r_1^2}{r_1^2 - r_2^2}.$$

Применяя четвертую теорию прочности, убеждаемся, что выполняется условие

$$\sigma_{\text{доп}} \geq \sqrt{0,5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}. \quad (11.12)$$

Толщину стенки цилиндрических трубопроводов (m), особенно в случае больших диаметров, обязательно следует проверять по условию устойчивости

$$S = 1,25 D_y \left(\frac{pl}{E_T D_y} \right)^{0,4} + C, \quad (11.13)$$

где E_T — модуль упругости материала трубопровода; D_y и l — диаметр условного прохода и длина трубопровода; C — допуск на толщину стенки, m . Зависимость модуля упругости от температуры для типовых конструкционных материалов трубопроводов показана на рис. 11.23.

§ 11.6. Устройства для передачи движения в вакуум

Необходимость в устройствах для передачи движения в вакуум появляется в связи с тем, что для улучшения условий работы привод механизмов удобнее размещать вне вакуумной камеры.

Устройства для передачи движения в вакуум делятся на три группы: 1) для передачи возвратно-поступательного движения; 2) для передачи качательного движения; 3) для передачи вращательного движения.

Внутри каждой группы возможна классификация по предельному давлению, передаваемому усилию, скорости перемещения, величине хода и т. д.

При конструировании любых вводов движения в вакуум следует стремиться к тому, чтобы герметизирующий элемент не воспринимал передаваемых усилий, а направляющие и опоры были бы по возможности расположены вне вакуумной камеры. Для пар трения, размещенных в вакууме, следует принимать специальные меры против схватывания трущихся материалов. С этой целью в качестве смазки можно применить дисульфид молибдена MoS_2 ,

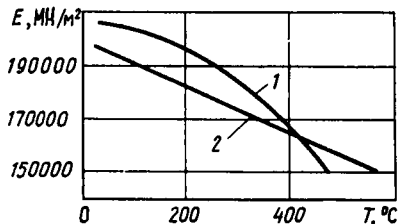


Рис. 11.23. Зависимость модуля упругости материала трубопроводов от температуры:

1 — углеродистая сталь; 2 — легированные стали аустенитного класса

сульфидировать поверхности трения или использовать материалы, сильно отличающиеся по своим физическим свойствам, например металл и керамику.

Вводы поступательного движения для низкого и среднего вакуума изготавливаются обычно с резиновыми и фторопластовыми уплотнителями.

Резина и сталь имеет большой коэффициент трения, и резиновые уплотнители подвижных соединений всегда нуждаются в смазке. Фторопласт может работать без смазки, но его износ во время работы должен компенсироваться установкой дополнительных упругих элементов.

Уплотнения для ввода поступательного движения в высокий и сверхвысокий вакуум изготавливаются полностью из металла и могут быть прогреты с целью обезгаживания до 400...500 °С.

Вводы вращения в вакуум отличаются большим разнообразием конструктивных решений, кинематические схемы которых представлены на рис. 11.24, *а...ж*.

Ввод вращения в вакуум с пространственным шарниром и уплотнением в виде гибкого элемента, совершающего качательное движение, обеспечивает кинематически жесткую передачу больших моментов с малой частотой вращения. Максимальная частота вращения ограничена усталостной прочностью гибкого элемента, например сильфона или мембраны, и работоспособностью пары трения, находящейся в вакууме. Ввод может выдерживать нагрев до 450 ... 500 °С, что позволяет применять его в сверхвысоковакуумных установках.

Магнитный ввод вращения в вакуум применяется в высоковакуумных системах для передачи вращательного движения с большой частотой вращения и малым крутящим моментом. Он может быть сделан прогреваемым, но не обеспечивает кинематической жесткости передачи.

Молекулярный ввод вращения с дополнительной откачкой применяется для передачи в высокий вакуум больших крутящих моментов при большой частоте вращения. Уплотнение между атмосферой и промежуточным вакуумом во время прогрева вакуумной системы требует принудительного охлаждения. Давление в промежуточной камере выбирается в пределах 10^{-3} ... 10^1 Па. Уплотнение между вакуумной камерой и промежуточным вакуумом обеспечивается сопротивлением зазора между валом и корпусом установки.

Ввод вращения в вакуум с помощью волновой передачи обеспечивает кинематически жесткую передачу вращательного движения с небольшой частотой вращения. Его можно использовать в системах высокого вакуума.

Конструкции вводов вращения со звеном, совершающим плоскопараллельное движение, показанные на рис. 11.25, *а, б*, применяются в прогреваемых высоковакуумных системах для передачи

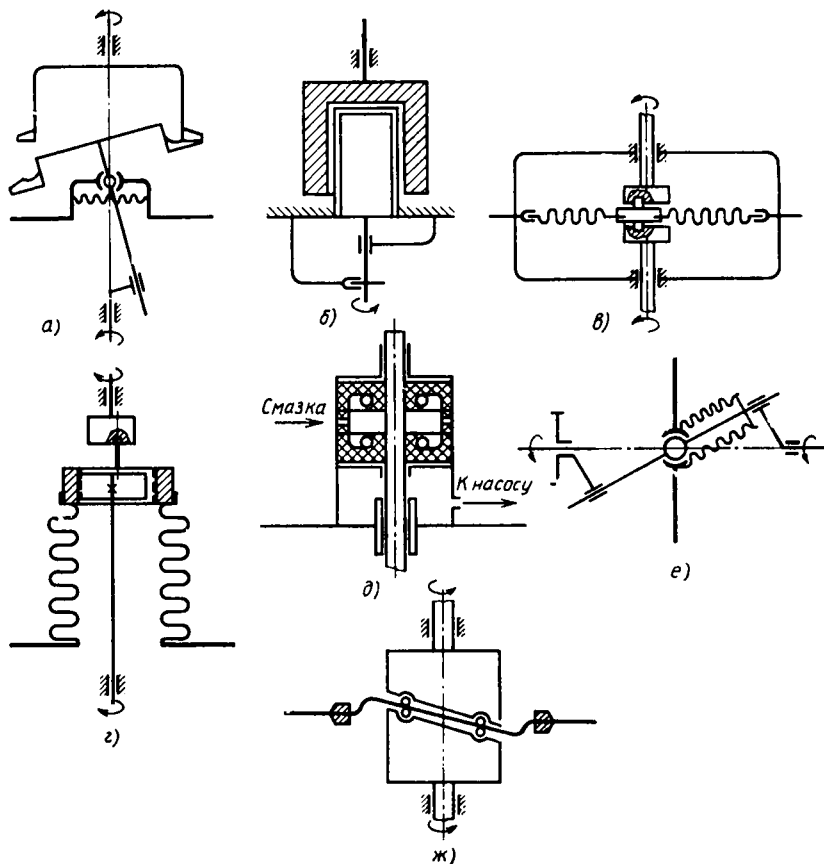


Рис. 11.24. Схемы вводов вращения в вакуум:

а — с пространственным шарниром и мембраной; *б* — магнитный; *в* — со звеном, совершающим плоскопараллельное движение, и мембраной; *г* — со звеном, совершающим плоскопараллельное движение, и сильфоном; *д* — молекулярное уплотнение с дополнительной откачкой; *е* — с пространственным шарниром и сильфоном; *ж* — с волновой передачей

небольших крутящих моментов при малой частоте вращения. На рис. 11.25, *в* показана конструкция ввода вращения с притертыми шайбами, используемыми для работы со смазкой во вращательных насосах.

Вводы поступательного движения для низкого и среднего вакуума (рис. 11.25, *д*, *е*) изготавливаются обычно с резиновыми или фторопластовыми уплотнителями. Сальниковое уплотнение (рис. 11.25, *д*) состоит из штока 1, зажимной гайки 2, металлической шайбы 3, резиновой прокладки 4, фторопластовой втулки 5, корпуса 6 и шпонки 7. Резиновая прокладка является упругим элемен-

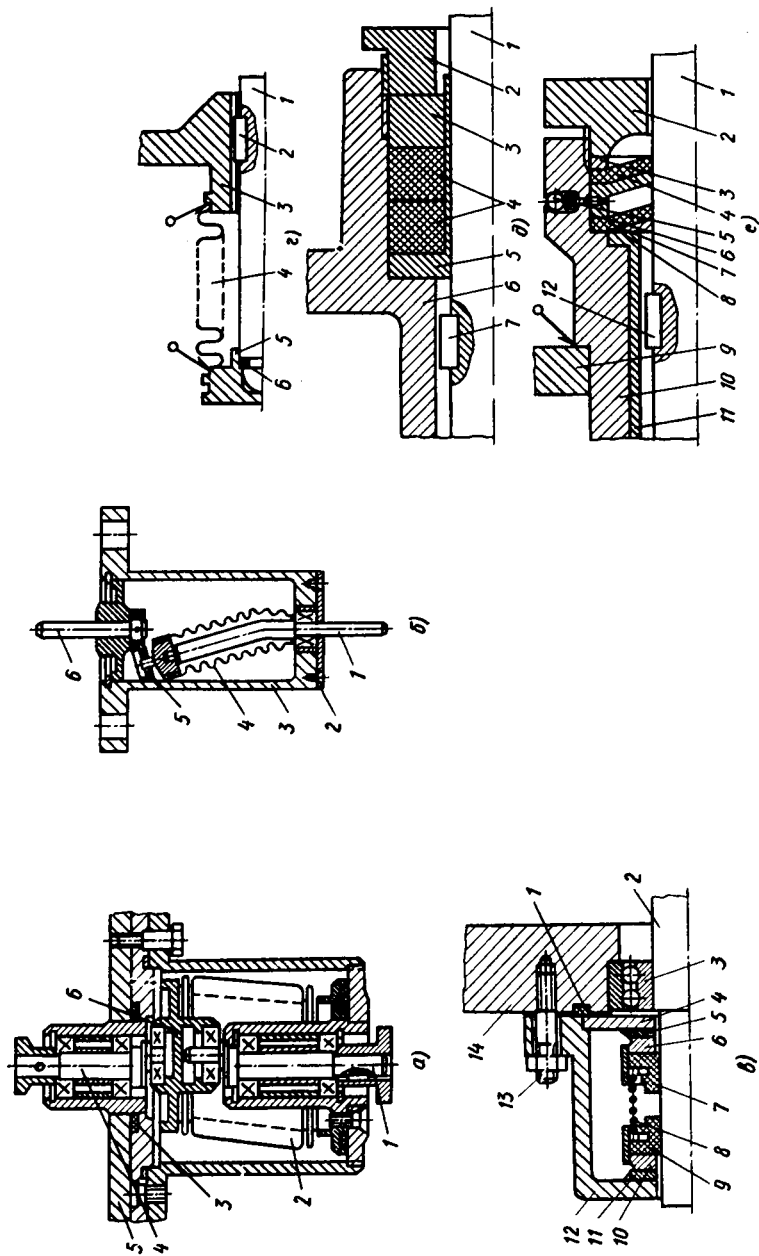


Рис. 11.25. Конструкции вводов вращения в вакуум:

а — сильфонный ввод со ступенчатым валом; 1 — входной вал; 2 — сильфон; 3 — резиновое уплотнение; 4 — выходной вал; 5 — вакуумная камера; 6 — промасленная муфта; б — сильфонный ввод с изогнутым валом; 1 — входной вал; 2 — крышка; 3 — стакан; 4 — сильфон; 5 — поводковая муфта; 6 — выходной вал; в — ввод с притертыми шайбами; 1 — уплотнительная прокладка; 2 — вал; 3 — подшипник; 4 — крышка; 5 — ввод с неподвижными кольцами; 6, 10 — вращающиеся кольца; 7, 9 — уплотнители; 8 — пружина; 12 — стакан; 13 — крепеж; 14 — корпус; г — сильфонный ввод поступательного движения; д — сальниковый ввод; е — уплотнение с резиновыми манжетами

том для тонкой фторопластовой втулки, толщина стенки которой 0,5 мм. Через такой ввод можно передавать поступательное перемещение с большой величиной хода, но с малой скоростью — не более 0,1 м/с.

Уплотнение с резиновыми манжетами (рис. 11.25, *е*) состоит из штока 1, зажимной гайки 2, металлических шайб 3 и 8, резиновых манжет 4 и 7, масленки 5, маслораспределительного кольца 6, стенки вакуумной камеры 9, корпуса 10, подшипника скольжения 11, шпонки 12.

Уплотнение для ввода поступательного движения в высокий и сверхвысокий вакуум (рис. 11.25, *з*) изготавливается полностью из металла и может быть прогрето с целью обезгаживания до 450...500 °С. Оно состоит из штока 1, шпонки 2, корпуса 3, сиффона 4, головки 5, штифта 6. Сиффон 4 из нержавеющей стали приваривается к головке 5 и корпусу 3 электронно-лучевой или аргонодуговой сваркой.

Схемы вводов качательного движения в вакуум, показанные на рис. 11.26, имеют угол качания α в мембранных вводах не более 10°, а в сифонных — 30°. Для получения больших углов качания необходимы ускорительные передачи или вводы вращательного движения. Возможно применение поступательных вводов с последующим преобразованием поступательного движения в качательное.

При определении работоспособности вводов вращения, поступательного и качательного движений наибольшую трудность представляет расчет сиффонов.

Сиффон можно рассматривать как пружину с жесткостью

$$C_0 = \frac{Q}{\lambda} = \frac{2,5ED_n(1 + 0,113t^2)\delta^{2,45}}{n(D_n - D_v)^3}, \quad (11.14)$$

где Q — сила упругости сиффона; λ — упругий ход сиффона; D_n и D_v — наружный и внутренний диаметры сиффона, мм; t — шаг гофра, мм; δ — толщина стенки сиффона, мм; n — число гофр; E — модуль упругости материала сиффона. Для полутомпака Л80 модуль упругости $E=116\,000$ МПа, а для стали 12Х18Н10Т — 202 000 МПа. Наибольшее влияние на жесткость сиффона оказывают разность наружного и внутреннего диаметров и толщина

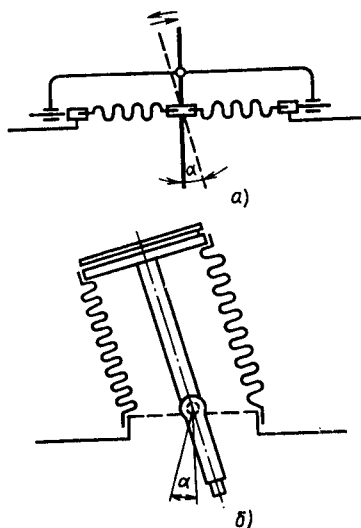


Рис. 11.26. Схемы вводов качательного движения в вакуум:

a — мембранный; *б* — сифонный

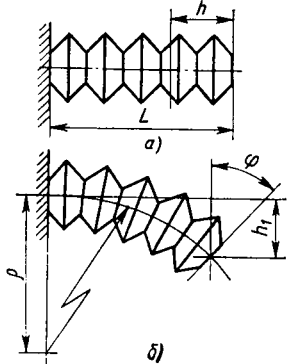


Рис. 11.27. Схемы деформации сифонов:
а — осевая; б — изгибная

стенки. Жесткость сифонов следует учитывать при расчете точных и слабонагруженных механизмов.

Расчет на прочность сифонов можно вести, используя расчетную схему, в которой сифон рассматривается как система кольцевых пластин, попеременно связанных по внешнему и внутреннему контурам.

На рис. 11.27 показаны две основные схемы деформации сифонов во вводах движения в вакуум. Осевая деформация сифонов используется во вводах поступательного движения, а изгибная — во вводах вращательного движения.

При осевой деформации сифонов по схеме рис. 11.27, а на величину h возникают напряжения

$$\sigma_0 = \frac{4hE\delta K_2}{D_B^2 n (1 - \mu^2)}, \quad (11.15)$$

где μ — коэффициент Пуассона; K_2 — постоянный коэффициент, зависящий от $\alpha = R_H/R_B$.

Для контуров сифона:

наружного

$$K_{2H} = \frac{\alpha^2 - 1 - 2 \ln \alpha}{(\alpha^2 - 1)^2 - 4\alpha^2 \ln^2 \alpha},$$

внутреннего

$$K_{2B} = \frac{2\alpha^2 \ln \alpha - (\alpha^2 - 1)}{(\alpha^2 - 1) - 4\alpha^2 \ln^2 \alpha}.$$

При изгибной деформации сифонов по схеме рис. 11.27, б напряжения зависят от угла поворота торца сифона φ . Установочная длина сифона при этом не изменяется. Расчетная формула для напряжений на наружном и внутреннем контурах имеет вид

$$\sigma_H = \frac{\varphi E \delta K_3}{n (1 - \mu^2) D_B}, \quad (11.16)$$

где при расчете напряжений по наружному контуру

$$K_{3H} = \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha (\alpha^2 + 1) \ln \alpha - \alpha^2 + 1},$$

а по внутреннему контуру

$$K_{3B} = \frac{\alpha^2 - 1}{(\alpha^2 + 1) \ln \alpha - \alpha^2 + 1}.$$

Из записанных формул (11.15) и (11.16) видно, что напряжение по внутреннему контуру больше, чем по внешнему.

Во вводах движения в вакуум сильфоны испытывают циклические нагрузки. Для приближенного расчета долговечности сильфона N , выраженной в количестве рабочих циклов или нагружений, которые сильфон может выдержать до разрушения, используется зависимость вида

$$N = K/\sigma^x, \quad (11.17)$$

где $K = 11 \cdot 10^{11}$, $x = 4,42$; для стали 12X18H10T σ — максимальные напряжения в сильфоне по одной из схем нагружения, МПа.

Требуемая долговечность сильфонов зависит от условий их работы и может колебаться от 10 000 до 1 000 000 циклов. В особо тяжелых случаях ограничиваются даже 1500 циклами.

§ 11.7. Электрические вакуумные вводы

Для питания электрическим током различных устройств, работающих внутри вакуумной камеры, необходимы герметичные электрические вводы, изолированные от корпуса вакуумной камеры. В зависимости от назначения электрические вводы могут быть низковольтными или высоковольтными, слаботочными или сильноточными, низкочастотными или высокочастотными, низковакуумными или высоковакуумными.

Для подвода электроэнергии к нагревательным элементам широко применяются низкочастотные низковольтные сильноточные вводы. Пример конструкции такого ввода для непрогреваемых вакуумных систем показан на рис. 11.28. В корпусе камеры 11 стакан 10 уплотняется прокладкой 9. Гайка 8 затягивает сальник 12 в корпусе ввода 7. Токосъем 6 уплотняется прокладками 5 в головке 4.

Материалом для прокладок служит резина, а изоляторы 2 могут быть изготовлены из любых сортов вакуумной керами-

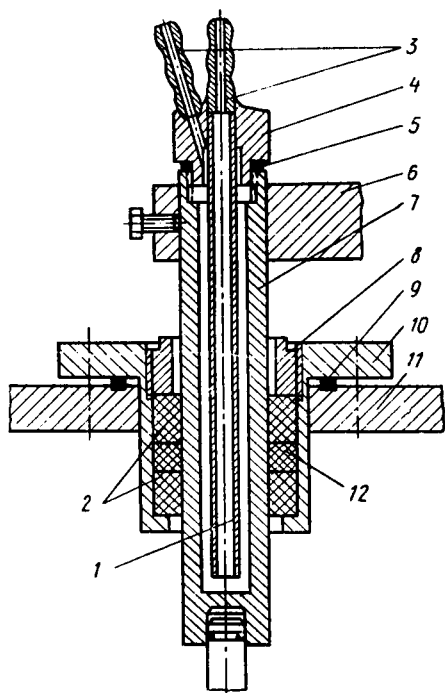


Рис. 11.28. Водоохлаждаемый электрический ввод для низковакуумных систем

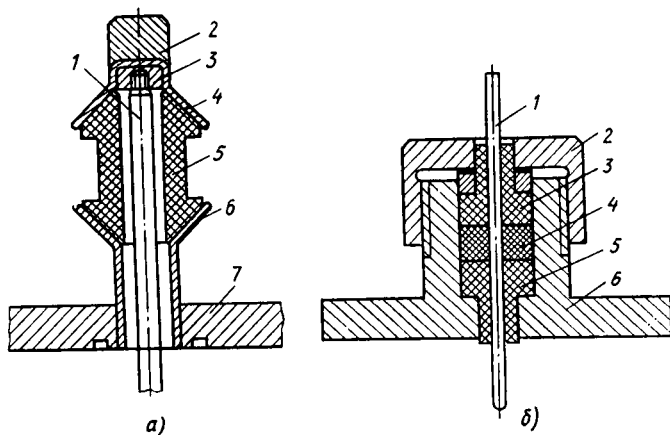


Рис. 11.29. Электрические вводы: *а* — высоковольтный прогреваемый электрический ввод для сверхвысоковакуумных систем, *б* — ввод для термопар

ки. Во время работы для охлаждения через штуцера 3 и трубку 1 подается вода.

Высоковольтный ввод для сверхвысоковакуумных систем (рис. 11.29, *а*) приваривается к основанию 7 нижним колпачком 6. Керамика 5 соединяется с колпачками 6 и 4 вакуумно-герметичной пайкой твердыми припоями. Одновременно производится пайка головки 2 и гнезда 3 к верхнему колпачку 4. Центральный стержень 1 завинчивается в гнездо 3.

Для точного измерения температуры при вводе в вакуумную систему термопары нужно стремиться к отсутствию переходных контактов. Ввод, показанный на рис. 11.29, *б*, позволяет этого достигнуть и может применяться в непрогреваемых вакуумных системах. В корпусе 6 изоляционными втулками 5 и 3 с прокладками 4 уплотняются один или оба провода термопары 1 с помощью накидной гайки 2. Материалом прокладки может служить резина, а изоляционных втулок — фторопласт.

§ 11.8. Вакуумные затворы

В вакуумных машинах и установках для коммутации различных частей вакуумной системы широко используются различные вакуумные затворы, классификация которых приведена на рис. 11.30.

В качестве натекаелей могут применяться пористые материалы, некоторые металлы, проницаемые для отдельных газов, например платина для водорода, серебро для кислорода и т. д. Микро-

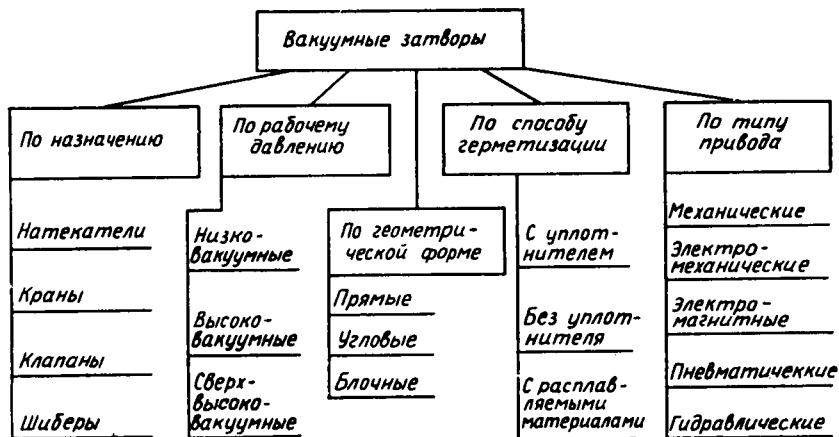


Рис. 11.30. Классификация вакуумных затворов

метрическое перемещение иглы в отверстиях, изменение зазора между материалами с различными коэффициентами линейного расширения могут быть применены для создания и регулировки больших вакуумных сопротивлений.

Вакуумные краны применяются в установках с малым газоотделением, в линиях предварительного разрежения и в случаях, когда не требуется получения больших проводимостей.

В металлических вакуумных клапанах и затворах, работающих при комнатной температуре, используются резиновые и фторопластовые уплотнители (рис. 11.31, а).

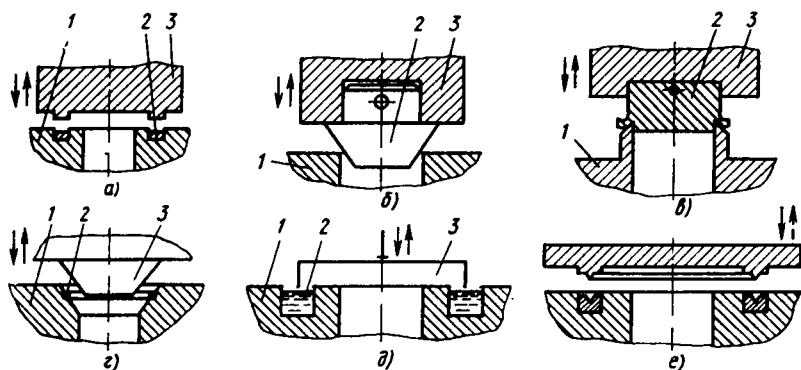


Рис. 11.31. Уплотнительные элементы вакуумных затворов:

1 — седло; 2 — уплотнитель; 3 — герметизирующий элемент

В прогреваемых конструкциях применяется герметизация за счет пластической деформации материала одной из соприкасающихся поверхностей. Широко распространена конструкция с конусным уплотнительным элементом (рис. 11.31, б), изготовленным из меди или алюминия. Недостатком этой конструкции является постепенное увеличение площади герметизирующих поверхностей, а следовательно, и усилия, необходимого для закрытия клапана. В конструкции рис. 11.31, в уплотнительный элемент работает на срез, усилие герметизации не зависит от числа срабатываний, но возрастает ход запирающего элемента.

В конструкции рис. 11.31, г усилие герметизации и ход уплотнительного элемента не зависят от числа циклов срабатывания, но при этом не происходит и образования чистой поверхности в месте соприкосновения герметизирующих элементов. Надежная работа такой конструкции обеспечивается изготовлением уплотнителя из благородных металлов.

Усилие герметизации (на 1 мм длины уплотнителя) при использовании резиновых уплотнителей составляет 5...2,5 Н, при алюминиевых — 100...150 Н, при медных — 200...300 Н. Во всех конструкциях вакуумных затворов привод должен обеспечить постоянную величину герметизирующего усилия. Превышение оптимального герметизирующего усилия сокращает число циклов срабатывания затвора.

Уплотнители с расплавляемыми металлами, обычно галлий, индий, олово или свинец (рис. 11.31, д, е), не требуют больших усилий для закрывания. В конструкции рис. 11.31, д уплотнитель 2 в момент перемещения герметизирующего элемента 3 должен быть в расплавленном состоянии. В конструкции рис. 11.31, е уплотнитель расплавляется только время от времени для обновления герметизирующей поверхности. Затворы с расплавляемыми уплотнителями имеют малый срок службы из-за быстрого окисления, испарения и механического удаления уплотняющего материала.

Выбор кинематической схемы привода вакуумного затвора определяется усилием герметизации и величиной хода уплотняющего элемента. Часто встречается схема комбинированного ручного и электромеханического привода (рис. 11.32). В корпусе 1 с двумя присоединительными патрубками 10 и 12 поступательно движется герметизирующий элемент 11, связанный с корпусом сильфоном 2. Герметизирующее усилие создается в винтовой паре между валом 3 и корпусом 1. Ручной привод осуществляется от штурвала 7, который жестко связан с валом 3, диски фрикционной муфты 4 при этом разъединяются под воздействием пальца, движущегося в угловом пазу полумуфты 6. Усилие ручного привода не регулируется. Электромеханический привод от электродвигателя 9 через червячную передачу 8 и 5, фрикционную муфту 4 и винтовую пару на валу 3 создает герметизирующее усилие, величина которого огра-

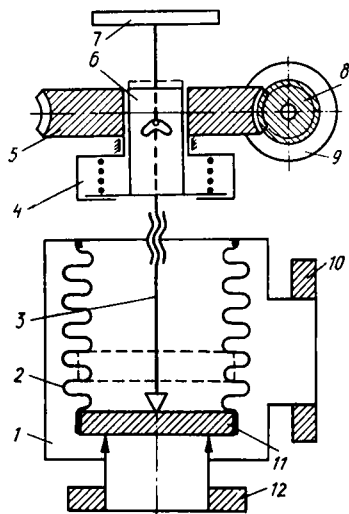


Рис. 11.32. Схема электро-механического привода вакуумных затворов

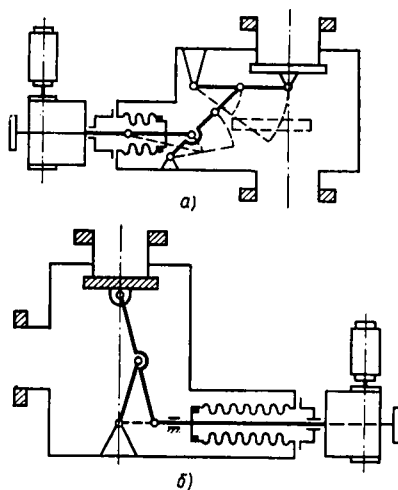


Рис. 11.33. Привод вакуумных затворов:
 а — шестизвенный механизм; б — эллипсограф

ничена максимальным крутящим моментом, передаваемым муфтой 4.

Электромагнитный привод удобен для дистанционного управления вакуумными клапанами. Герметизирующее усилие обычно создается пружиной. При включении электрического тока клапан открывается. Для облегчения условий работы электромагнита в клапанах со значительным герметизирующим усилием применяется схема с ручным взводом и электромагнитным спуском.

Для увеличения герметизирующего усилия и более удобной компоновки затворов применяются шарнирные механизмы (рис. 11.33, а), находящиеся в момент закрытия затвора в положении близком к крайнему, когда достигается наибольшее усилие передаваемого усилия. Механизм эллипсографа (рис. 11.33, б) имеет дополнительное преимущество, так как в месте герметизации в этом случае отсутствует составляющая запирающего усилия, перпендикулярная перемещению герметизирующего элемента. Это предотвращает появление трения в момент уплотнения и позволяет использовать сложные формы уплотняющих элементов.

Вакуумные затворы для трубопроводов больших диаметров для уменьшения габаритов стараются делать плоской формы, используя механизм параллелограмма с малой длиной кривошипа.

При разработке конструкций вакуумных затворов необходимо

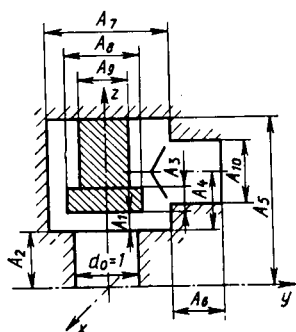


Рис. 11.34. Схема углового вакуумного клапана:

$A_1 \dots A_{10}$ — относительные размеры

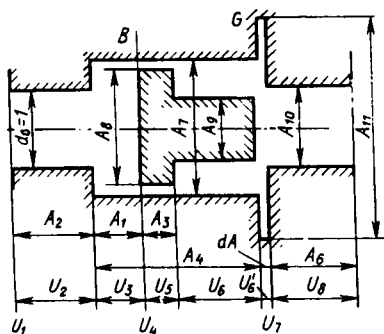


Рис. 11.35. Эквивалентная схема вакуумного клапана, изображенного на рис. 11.34

рассчитать их проводимости при молекулярном режиме течения газа. Для аналитического расчета проводимости затвора необходимо составлять его эквивалентную схему из простых элементов, для которых имеются аналитические зависимости.

В качестве таких простых элементов могут быть рассмотренные ранее длинные или короткие трубы, отверстия, концентрические трубы и т. д. При составлении эквивалентных схем основные трудности возникают при определении входных сопротивлений отверстий.

Аналитические формулы, полученные для проводимостей отверстий, справедливы при подключении их к бесконечному или полуграниченному объему или трубопроводу. В общем случае для произвольно расположенных поверхностей, предшествующих входному отверстию, аналитических зависимостей не существует. Для определения проводимостей в этом случае приходится использовать формулу для соединения двух трубопроводов различного поперечного сечения.

Можно оценить ошибку, возникающую при такой замене. Известно, что максимальная ошибка (12%), появляющаяся при расчете трубопроводов без учета входного сопротивления, возникает при длине трубопровода $l = 1,2d$, где d — диаметр трубопровода. В угловом клапане, например, имеется не менее двух входных сопротивлений, подключенных к ограниченному объему; таким образом, ошибка может составить 24% от общей проводимости клапана. Более высокой точности расчета можно достигнуть только применением метода статистических испытаний.

Рассмотрим в качестве примера расчет углового вакуумного клапана, схема которого изображена на рис. 11.34. Построим эквивалентную схему клапана. Трудности при составлении схемы

рис. 11.35 возникают в сечениях B и G . Невозможно аналитическим путем учесть влияние отношения A_7/d_0 и размера A_1 на проводимость входного отверстия в сечении B ; в сечении G размер A_{11} задается в достаточной степени произвольно, проводимость $U'_в$ участка длиной $dA \rightarrow 0$ равна бесконечности.

Уравнение для расчета проводимости такой эквивалентной схемы, рассматриваемой как ряд последовательно соединенных элементов, можно записать в следующем виде:

$$1/U_x = 1/U_1 + 1/U_2 + \dots + 1/U_8. \quad (11.18)$$

Считая, что расчет проводится для воздуха при комнатной температуре, для проводимости длинной трубки и отверстия при молекулярном режиме получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{U_x} = & \frac{1}{91d_0^2} + \frac{A_2}{121d_0^3} + \frac{A_1}{121A_7^3} + \frac{A_8^2}{91A_7^2(A_7^2 - A_8^2)} + \\ & + \frac{A_3A_7}{170[(A_7 - A_8)^2(A_7 + A_8)]} + \frac{A_7[A_4 - (A_1 + A_3)]}{170A_9[(A_7 - A_9)^2(A_7 + A_9)]} + \\ & + \frac{A_{11}^2}{91A_{10}^2(A_{11}^2 - A_{10}^2)} + \frac{A_6}{121A_{10}^3}. \end{aligned} \quad (11.19)$$

В выражении (11.19) U_x — общая проводимость клапана, m^3/c ; размеры A_1, \dots, A_{11} и d — в метрах.

Сделаем ряд преобразований в формуле (11.19), учитывая следующие условия и ограничения: 1) выберем A_{11} из условия $\pi A_7 A_{10} = \pi A_{11}^2 / 4$, откуда $A_{11} = 2\sqrt{A_7 A_{10}}$; 2) при отрицательных длинах участков их проводимость примем равной бесконечности.

При этом выражение (11.19) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{1}{U_x} = & \frac{1}{91d_0^2} + \frac{A_2}{121d_0^3} + \frac{A_1}{121A_7^3} + \frac{A_8^2}{91A_7^2(A_7^2 - A_8^2)} + \\ & + \frac{A_7 B f(A_1 - A_1)}{170[(A_7 - A_8)^2(A_7 + A_8)]A_8} + \frac{A_7[A_4 - (A_1 + A_3)]f(A_4 - A_1 - A_3)}{170[(A_7 - A_9)^2(A_7 + A_9)]A_9} + \\ & + \frac{A_7}{22,8A_{10}^2(4A_7 - A_{10})} + \frac{A_6}{121A_{10}^3}. \end{aligned} \quad (11.20)$$

В формулу (11.20) для удобства определения проводимости клапана при различных положениях уплотняющего элемента, места расположения бокового патрубка и т. д., когда отдельные участки в эквивалентной схеме могут отсутствовать, введены две функции:

$$B = \begin{cases} A_3, & \text{если } (A_4 - A_1) \geq A_3; \\ A_4 - A_1, & \text{если } (A_4 - A_1) < A_3; \end{cases}$$

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{sign}(x) = 1; \\ 0, & \text{если } \text{sign}(x) = -1. \end{cases}$$

Сравнить расчеты, сделанные по приведенным формулам (11.19) и (11.20), с расчетами, выполненными математическим моделированием методом статистических испытаний, можно по вероятности прохождения клапана молекулами, входящими в отверстие нижнего входного фланца: $P_{1 \rightarrow 2} = U_z / (91d_0^2)$.

Сравнение результатов расчета показывает, что при ходе клапана $A_1 > 0,245$ совпадение результатов расчета удовлетворительное и относительная погрешность аналитических расчетов не превышает 25%.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие дополнительные требования вакуумная техника предъявляет к конструкционным материалам?
2. Какие существуют способы соединения металла со стеклом?
3. В каких случаях применяется мягкая и твердая герметичная пайка?
4. Какие виды сварки используются для соединения вакуумных систем?
5. Каковы особенности применения разборных соединений с резиновым и металлическим уплотнителем?
6. Каковы преимущества и недостатки разборных соединений с фторопластовым и резиновым уплотнителями?
7. Какие виды деформации испытывают сильфоны при вращательном и поступательном движении в вакууме?
8. Чем отличаются конструкции прогреваемых и непрогреваемых электрических вводов?
9. Какие конструкции запирающих элементов применяются в вакуумных затворах для низкого, высокого и сверхвысокого вакуума?
10. Какими способами можно теоретически определить проводимость вакуумных клапанов и ловушек?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вакуумная техника с каждым годом все шире применяется в научных исследованиях и производстве. Одновременно увеличивается объем исследований, направленный на ее развитие. Расширяется диапазон работы вакуумных насосов и манометров, совершенствуются теоретические представления о самом вакууме и происходящих в нем физико-химических процессах. В последние годы большие успехи достигнуты при изучении поверхностных явлений, происходящих на границе газ—твердое тело. Разработаны новые приборы для анализа поверхности: Оже-спектрометры, вторично-ионные масс-спектрометры и т. д.

Дальнейшее развитие вакуумной техники будет идти по пути создания еще более эффективных средств получения вакуума.

анализа состава и парциальных давлений остаточных газов, течения, изучения свойств поверхности, совершенствования методов расчета и проектирования вакуумных систем, конструкции и технологии изготовления вакуумных установок. Неперспективные ранее принципы работы насосов, манометров и других элементов вакуумных систем после совершенствования их конструкции получают широкое применение. Расширение космических исследований ставит перед вакуумной техникой новые задачи по разработке имитационного оборудования для испытания космических аппаратов в земных условиях. Большие перспективы открываются перед вакуумной технологией при создании принципиально новых материалов и особо чистых веществ. Технология производства электронных приборов широко использует вакуумную технику.

Благодаря широкому применению численных методов повышается точность расчетов вакуумных систем. Многие задачи определения параметров течения разреженного газа в сложных элементах вакуумных систем, которые раньше не могли быть решены, теперь вычисляются с необходимой для практики точностью.

Вычислительная техника обеспечивает возможность автоматизации проектирования вакуумных систем. Создаются первые системы автоматизированного проектирования и банки данных современного вакуумного оборудования. Автоматизация инженерного труда позволяет при проектировании вакуумных систем и элементов находить оптимальные решения. Развитие микроЭВМ позволило создать совершенные системы управления вакуумными установками, выполняющими расчет и расшифровку спектров остаточных газов, анализ математических моделей технологических процессов.

Современная вакуумная техника позволяет получать и измерять давления в 10^{18} раз меньше атмосферного, но даже такое состояние газа еще нельзя назвать идеальным вакуумом: в 1 м^3 такого вакуума еще содержатся сотни молекул газа. Идеальный вакуум как среда, в которой могут распространяться гравитационное, электромагнитное и другие поля, является еще предметом тщательного исследования современной теоретической физики.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1

Рабочие жидкости масляных насосов

Рабочая жидкость	ГОСТ, ТУ	Давление насыщенных паров при 293 К, Па	Кинематическая вязкость при 293 К, 10 ⁶ м ² /с	Пределное давление насоса, Па	Плотность при 293 К, кг/см ³	Молярная масса, кг/моль	Вязкость, кДж/кгмоль	Коэффициенты уравнения $\lg \rho = A - B/T$	Окислительная стойкость
ВМ-1	ГОСТ 5.671—70	$3 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-6}$	65...69	$3 \cdot 10^{-4}$	870	450	$1,15 \cdot 10^5$	15,5 6000	Низкая
ВМ-2	ГОСТ 5.671—70	$3 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-6}$	65...69	$4 \cdot 10^{-4}$	870	450	$1,06 \cdot 10^5$	14,8 5567	»
ВМ-5	МРТУ38—1	$1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-6}$	68...74	$1 \cdot 10^{-6}$	870	450	$1,19 \cdot 10^5$	15,8 6173	»
ПЭС-В-1	ГОСТ 16480—70	$\leq 6 \cdot 10^{-6}$	16...33	$3 \cdot 10^{-4}$	970	700	$1,03 \cdot 10^5$	14,0 5360	Высокая
ПЭС-В-2	ГОСТ 16480—70	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-4}$	16...33	$2 \cdot 10^{-4}$	970	700	$8,70 \cdot 10^4$	12,1 4512	»
ПФМС2/Бл	ТУ 6-02-777—73	$6 \cdot 10^{-7} \dots 9 \cdot 10^{-5}$	8...13	$3 \cdot 10^{-4}$	1060	700	$1,08 \cdot 10^5$	16,0 5694	»
ФМ-1	ТУ 02-758—73	$1,3 \cdot 10^{-8}$	35...37	$5 \cdot 10^{-8}$	1096	547	$1,08 \cdot 10^5$	14,0 6159	Удовлетворительная
5Ф4Э	ТУ 609-447—70	$1,3 \cdot 10^{-9}$	130	$9,4 \cdot 10^{-7}$	1200	446	—	22,6 9836	»

Характеристики механических объемных насосов

Основные характеристики	Поршневые				Пластинчато-роторные				Многопластинчатые					
	ВНК-0,5М	ЗВНП-3	2ДВНП-6	ВН-01	ЗВНР-1Д	2ВНР-5ДМ	РВН-6И	РВН-25	РВН-50					
Диапазон рабочих давлений, Па	$1 \cdot 10^4 \dots$ $1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^3 \dots$ $1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^2 \dots$ $1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^0 \dots$ $1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-1} \dots$ $1 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-2} \dots$ $1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^1 \dots$ $1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^1 \dots$ $1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^1 \dots$ $1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^1 \dots$ $1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^1 \dots$ $1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^1 \dots$ $1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^1 \dots$ $1 \cdot 10^5$	
Быстрооткачки в рабочем диапазоне давлений, м ³ /с	0,0080	0,0630	0,1050	0,0001	0,0010	0,0050	0,1000	0,4000	0,8000	0,1000	0,4000	0,8000	0,8000	
Предельное давление: общее с газобалластом	—	—	—	—	$7 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^0$	—	—	—	—	—	—	—	
общее без газобалласта	$5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^1$	$5 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^1$	10^1	$1 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^1$	10^1	10^1	
парциальное (по воздуху)	$5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^1$	$5 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^1$	10^1	10^1	$1 \cdot 10^1$	10^1	10^1	10^1	
Частота вращения ротора, об/мин	1500	750	1500	1400	2800	1430	1450	600	500	1450	600	500	500	
Количество масла, заливаемого в насос, дм ³	—	—	—	—	0,5	1,2	—	—	—	—	—	—	—	
Расход охлаждающей воды, дм ³ /с	2,75	0,04	0,05	—	—	—	0,08	0,18	0,36	0,08	0,18	0,36	0,36	
Мощность электродвигателя, кВт	3	5,5	11	0,12	0,25	0,55	15	55	75	15	55	75	75	
Диаметр впускного патрубка, мм	80	100	100	8	10	16	110	150	250	110	150	250	250	
Габариты (длина X ширина X высота), мм	862 640 1725	1430 795 925	1770 795 925	306 135 170	320 130 200	540 160 280	1500 700 740	2250 1000 1100	3000 1200 1500	3000 1200 1500	1500 700 740	2250 1000 1100	2250 1000 1500	4500
Масса, кг	540	750	1500	8,3	9,5	30	310	2250	4500	310	2250	4500	4500	

Основные характеристики	Водокольцевые									
	ВВН1-0,75	ВВН1-1,5	ВВН1-3	ВВН1-6	ВВН1-12	ВВН1-25	ВВН1-50	ВВН1-300		
Диапазон рабочих давлений, Па	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$
Быстрота откачки в рабочем диапазоне давлений, м ³ /с	0,0125	0,0250	0,0500	0,1000	0,2000	0,4200	0,8300	5,000		
Предельное давление: общее с газобалластом	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
общее без газобалласта	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
парциальное (по воздуху)	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
Частота вращения ротора, об/мин	1500	1500	1500	1500	1000	750	600	250		
Количество масла, заливаемого в насос, дм ³	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Расход охлаждающей воды, дм ³ /с	0,05	0,16	0,13	0,25	0,38	1,00	2,00	12		
Мощность электродвигателя, кВт	2,2	5,5	7,5	18,5	22	90	132	630		
Диаметр впускного патрубка, мм	63	63	78	110	135	175	200	300		
Габариты (длина×ширина×высота), мм	815	695	1195	1435	1840	2656	3490	6600		
	332	354	385	590	710	845	2330	3110		
	333	650	755	980	1220	1540	2060	2120		
Масса кг	90	134	91	500	885	1095	2450	95000		

Золотниковые

Основные характеристики	АВЗ-20Д	АВЗ-63Д	АВЗ-90	АВЗ-125Д	АВЗ-180	НВЗ-300	НВЗ-500
Диапазон рабочих давлений, Па	$5 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^0 \dots 1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^0 \dots 1 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^0 \dots 1 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^0 \dots 1 \cdot 10^5$
Быстрога откочки в рабочем диапазоне давлений, м ³ /с	0,0200	0,0630	0,0900	0,1250	0,1850	0,3000	0,5000
Предельное давление: общее с газобалластом	$7 \cdot 10^0$	$7 \cdot 10^0$	$4 \cdot 10^2$	$7 \cdot 10^0$	$4 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^2$
общее без газобалласта	$1 \cdot 10^0$	$7 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^0$	$7 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^0$	$7 \cdot 10^0$	$7 \cdot 10^0$
парциальное (по воздуху)	$1 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^0$
Частота вращения ротора, об/мин	1500	1500	1500	1500	1500	1000	1000
Количество масла, заливаемого в насос, дм ³	3,5	10	14	20	28	100	140
Расход охлаждающей воды, дм ³ /с	—	0,20	0,20	0,40	0,40	1,50	2,00
Мощность электродвигателя, кВт	2,2	7,5	11	15	15	37	55
Диаметр впускного патруб-ка, мм	40	100	100	100	100	160	160
Габариты (длина×ширина×высота), мм	650 400 665	1000 575 1035	1000 575 1035	1070 875 1055	1070 875 1055	1895 1510 1720	2765 1760 1355
Масса, кг	185	620	600	930	880	2200	4000

Характеристики двухрогорных вакуумных насосов

Основные характеристики	Типы насосов							
	ДВН-5-1	ДВН-5-2	ДВН-50-1	ДВН-50-2	ДВН-150-1	2ДВН-500	2ДВН-1500	ДВН-5000
Диапазон рабочих давлений, Па	$4 \cdot 10^0 \dots 2 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^{-2} \dots 2 \cdot 10^1$	$4 \cdot 10^{-2} \dots 2 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^0 \dots 2 \cdot 10^1$	$4 \cdot 10^0 \dots 2 \cdot 10^1$	$4 \cdot 10^0 \dots 2 \cdot 10^1$
Быстрота откачки в рабочем диапазоне давлений, м ³ /с	0,005	0,007	0,045	0,050	0,135	0,500	1,500	5,000
Предельное остаточное давление, Па:								
общее	$7 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-1}$
парциальное (по воздуху)	—	$5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	—	$7 \cdot 10^{-3}$	—	—	—
Наибольшее давление запуска, Па	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$
Расход охлаждающей воды, дм ³ /с	0,01	—	0,01	0,02	0,02	0,1	0,1	—
Мощность электродвигателя, кВт	0,18	0,18	0,7	1,5	1,5	7,5	10	28
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	458 158 187	261 186 224	415 240 290	645 360 325	623 240 260	1375 600 845	1835 580 485	2580 890 1145
Масса, кг	17	23	28	60	45	565	830	1900
Диаметр входного патрубка, мм	40	40	85	85	100	175	250	—

Характеристики турбомолекулярных насосов

Основные характеристики	Типы насосов							
	ТМН-100	ТМН-200	ТМН-500	ТМН-1000	ТМН-5000	ТМН-10000	ТМН-20000	
Диапазон рабочих давлений, Па	$5 \cdot 10^{-7}$... $1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-7}$... $1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-6}$... $1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-7}$... $1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-7}$... $1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-7}$... $1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-7}$... $1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-6}$... $1 \cdot 10^{-2}$
Быстрога откачки воздуха в рабочем диапазоне давлений, м ³ /с	0,10	0,25	0,50	1,00	6,30	11,0	18,0	
Предельное остаточное давление, Па	10^{-7}	10^{-7}	$8 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}	$2 \cdot 10^{-6}$	
Наибольшее выпускное давление, Па	10°	10°	10°	10°	10°	10°	10°	
Частота вращения ротора, с ⁻¹	300	300	300	400	100	100	83,3	
Мощность электродвигателя, кВт	0,3	0,3	0,8	0,25	2,0	7,0	7,0	
Источник питания электродвигателя	НВР-3 СПЧ	НВР-3 СПЧ	НВЗ СПЧФ	—	—	—	—	
Расход охлаждающей воды, дм ³ /с	0,01	0,01	0,03	—	0,06	—	—	
Диаметр впускного патрубка, мм	125	160	260	—	500	—	—	
Диаметр выпускного патрубка, мм	32	50	50	—	100	—	—	
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	—	675	—	—	—	—	—	
	—	310	—	—	—	—	—	
	—	385	—	—	—	—	—	
Масса насоса, кг	110	205	210	190	1500	3500	3910	

Характеристики высоковакуумных паромасляных насосов

Основные характеристики	Типы насосов									
	Н-0,025-2	НВО-40М	НВД-0,15	НВД-0,25	НВДС-100	Н-100/350	Н-160/700	Н-250/2500	Н-400/7000	Н-630/18000
Диапазон рабочих давлений, Па	$10^{-4} \dots 10$	$10^{-3} \dots 5$	$10^{-3} \dots 7$	$10^{-3} \dots 7$	$10^{-4} \dots 4$	$10^{-4} \dots 3$	$10^{-4} \dots 3$	$10^{-4} \dots 3$	$10^{-4} \dots 3$	$10^{-4} \dots 3$
Быстрота откачки в рабочем диапазоне давлений, м ³ /с	0,01	0,04	0,08	0,12	0,24	0,31	0,64	2,15	5,60	15,5
Предельное остаточное давление, Па	$1 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Наибольшее выпускное давление, Па	92	40	66	66	40	27	33	27	27	27
Мощность нагревателя, кВт	0,23	0,45	0,45	0,5	0,6	0,5	0,8	2	4	9
Расход воды на охлаждение насоса, дм ³ /с	—	—	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,06	0,2
Количество рабочей жидкости, дм ³	0,02	0,1	0,1	0,13	0,1	0,07	0,30	0,55	1,40	5,00
Диаметр впускного патрубка, мм	40	62	85	100	100	100	160	250	400	630
Диаметр выпускного патрубка, мм	14	10	20	20	25	25	32	63	63	100
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	—	283	295	320	275	275	425	705	859	1345
	40	200	200	210	180	170	260	330	526	1015
	—	302	350	421	360	310	370	588	762	1300
Масса, кг	—	8	9	14	8	6,5	16	31,5	80	280

Характеристики бустерных паромасляных насосов

Основные характеристики	Типы насосов			
	НВБМ-0,5	НВБМ-2,5	НВБМ-5	НВБМ-15
Диапазон рабочих давлений, Па	$5 \cdot 10^{-3} \dots 14$	$4 \cdot 10^{-3} \dots 40$	$4 \cdot 10^{-3} \dots 40$	$4 \cdot 10^{-3} \dots 40$
Быстрота действия, м ³ /с	0,80	2,60	5,70	17,5
Предельное остаточное давление, Па	$1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Наибольшее выпускное давление, Па	90	200	200	200
Диаметр входного патрубка, мм	160	250	400	630
Диаметр выходного патрубка, мм	70	100	160	160
Количество масла, заливаемого в насос, дм ³	7	23	57	120
Расход охлаждающей воды, дм ³ /с	0,04	0,1	0,2	0,5
Мощность электронагревателя, кВт	2	6	12	36
Габаритные размеры, (длина \times ширина \times высота), мм	515	740	1150	1550
	465	590	910	1500
	1065	1710	2340	2700
Масса, кг	67	230	380	1550

Таблица П.7

Характеристики геттерно-ионных насосов

Основные характеристики	Типы насосов			
	ЭГИН-0,8/0,1	ЭГИН-1,0/0,1	ЭГИН-1,6/0,25	ЭГИН-10/1,5
Диапазон рабочих давлений, Па	$4 \cdot 10^{-7} \dots 3 \cdot 10^0$	$4 \cdot 10^{-7} \dots 3 \cdot 10^0$	$4 \cdot 10^{-7} \dots 3 \cdot 10^0$	$4 \cdot 10^{-7} \dots 3 \cdot 10^0$
Быстрота откочки, м ³ /с	0,8	1,0	1,6	5,0
Предельное остаточное давление, Па	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$
Наибольшее давление запуска насоса, Па	13	13	13	13
Число испарителей	2	2	2	6
Мощность, потребляемая насосом, кВт	1,0	1,13	2,25	9,8
Габаритные размеры насоса (длина \times ширина \times высота), мм	612	530	630	1100
	580	370	430	1100
	647	525	540	1000
Габаритные размеры блока питания и управления (длина \times ширина \times высота), мм	712	—	—	—
	1034	—	—	—
Масса насоса, кг	100	100	150	300
				550

Характеристики магниторазрядных насосов

Основные характеристики	Типы насосов							
	НМД-0,0063	НМД-0,025	НМД-0,063	НМД-0,1	НМД-0,25	НМД-0,68	НМД-1	
Диапазон рабочих давлений, Па	$4 \cdot 10^{-7}$... $2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-7}$... $2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-7}$... $2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-7}$... $2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-7}$... $2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-7}$... $2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-7}$... $2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-7}$... $2 \cdot 10^{-1}$
Быстрота откачки, м ³ /с	0,006	0,022	0,06	0,11	0,25	0,65	1,20	
Предельное остаточное давление, Па	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$
Наибольшее давление запуска, Па	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^0$
Диаметр входного патрубка, мм	25	100	100	100	160	250	250	250
Габариты насоса (длина × ширина × высота), мм	85	157	320	320	320	500	554	554
	80	84	106	180	327	350	500	500
	160	220	320	320	340	580	580	580
Масса насоса, кг	2,9	8,4	21	32	53	190	290	290
Тип блока питания	БП-0,0063	БП-0,025	БП-0,063	БП-0,1	БП-0,25	БП-0,63	2 × БП-0,63	2 × БП-0,63
Габариты блока питания (длина × ширина × высота), мм	480	480	480	480	480	480	480	480
	300	300	320	320	320	320	320	320
	220	220	300	300	300	300	300	300
Масса блока питания, кг	21	20	37	35	47	47	47	2 × 47

Характеристики криоадсорбционных насосов

Основные характеристики	Типы насосов			
	ЦВН-0,1-2	ЦВН-0,3-2	ЦВН-1-2	ЦВН-1,5-3
Диапазон рабочих давлений, Па	$5 \cdot 10^3 \dots 10^5$	$3 \cdot 10^1 \dots 10^5$	$5 \cdot 10^3 \dots 10^5$	$1 \cdot 10^1 \dots 10^5$
Быстрота откачки, м ³ /с	0,002	0,004	0,006	0,010
Остаточное давление, Па	$1 \cdot 10^0$	$7 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^0$
Количество азота, откачиваемое при остаточном давлении, м ³ ·Па	$1 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
Расход жидкого азота для начального охлаждения, дм ³	1,3	2	6	6
Расход жидкого азота в установившемся режиме, дм ³ /ч	0,25	0,35	0,25	0,5
Количество адсорбента, кг	0,1	0,3	1	1,5
Время регенерации цеолита СаА-4в при атмосферном давлении, ч	3	2	3	3
Мощность нагревателя, кВт	0,4	0,14	0,83	0,35
Габариты (длина×ширина×высота), мм	192	—	124	—
	192	—	124	—
	390	—	390	—
Масса, кг	1,3	—	4,2	—

Таблица П.10

Характеристики вакуумметров

Наименование вакуумметра	Типы вакуумметров	Диапазон рабочих давлений, Па	Погрешность измерения, %	Габариты (длина×ширина×высота), мм	Масса, кг	Потребляемая мощность, Вт	Тип преобразователей
Деформационный	ВДГ-1	$10 \cdot 10^1 \dots 1 \cdot 10^4$	±15	—	—	—	ПМГД-1
Тепловой	ВТСО-1	$3 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10^4$	±10	80×150× ×295	—	—	—
	ВСБ-1	$1 \cdot 10^0 \dots 4 \cdot 10^3$	±30	390×248× ×257	14	140	МТ-6 МТ-6-3

Наименование вакуумметра	Типы вакуумметров	Диапазон рабочих давлений, Па	Погрешность измерения, %	Габариты (длина×ширина×высота), мм	Масса, кг	Потребляемая мощность, Вт	Тип преобразователей
Магнитный	ВТ-2А-П	$1 \cdot 10^{-1} \dots 3 \cdot 10^2$	± 30	$226 \times 248 \times 257$	9	110	ПМТ-2 ПМТ-4М МТ-8
	ВТ-3	$1 \cdot 10^{-1} \dots 7 \cdot 10^2$	± 30	$320 \times 185 \times 150$	4,5	35	ПМТ-2 ПМТ-4М МТ-8
	ВТБ-1	$1 \cdot 10^0 \dots 4 \cdot 10^3$	-40	$200 \times 158 \times 319$	6	—	МТ-6
	РВТ-2М	$1 \cdot 10^0 \dots 4 \cdot 10^3$	-40 ... +60	$100 \times 158 \times 206$	2,5	—	МТ-6
	ВМБ-3	$1 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^3$	± 170	$380 \times 290 \times 240$	19	150	ПММ-13
	ВМБ-6	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-1}$	-50 ... +80	$400 \times 200 \times 390$	16	100	ПММ-32
	ВМБ-8	$1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-1}$	-55 ... +130	$240 \times 158 \times 335$	35	75	ПММ-32
	ВМБ-11	$1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-1}$	-50 ... +100	—	—	—	ПММ-46
	ВИМ-2	$1 \cdot 10^{-14} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	± 70	$386 \times 278 \times 292$	22	120	ПММ-14
	Ионизационно-термопарный	ВИТ-2	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^1$	± 30	$320 \times 280 \times 215$	10	75
ВИТ-3		$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^2$	± 35	$230 \times 360 \times 485$	15	75	ПМТ-2 ПМТ-4М МТ-8
Ионизационный	ВИ-12	$1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	± 50	$448 \times 340 \times 287$	30	280	ПМИ-12 ПМИ-12-8
	ВИ-14	$1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^1$	± 50	$480 \times 220 \times 360$	20	140	ПМИ-27 ПМИ-12 ПМИ-12-8
	ВИЦБ-11	$2 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^2$	—	$100 \times 158 \times 230$	3,0	—	ИМ-12 ПМИ-10-2
	ВИО-1	$7 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^{-1}$	± 20	$228 \times 95 \times 328$	26	—	ПМИ-39-2

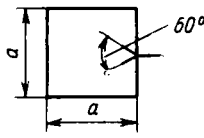
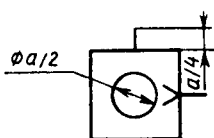
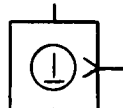
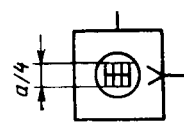
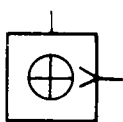
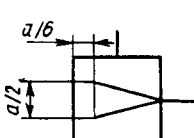
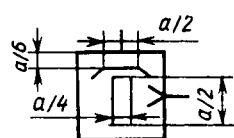
Характеристики теченскателей

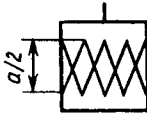
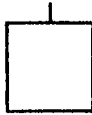
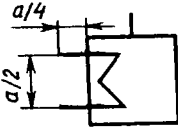
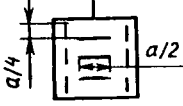
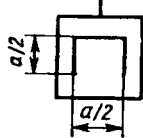
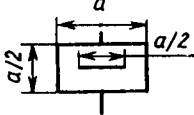
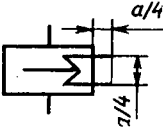
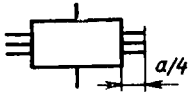
Типы теченскателей	Принцип действия	Наименьший регистрируемый поток, м ³ ·Па/с	Примечание
ПТИ-7А	Масс-спектрометрический	$7 \cdot 10^{-12}$	Испытание на герметичность объектов, допускающих откачку
ПТИ-10	»	$7 \cdot 10^{-13}$	То же
СТИ-11	»	$7 \cdot 10^{-14}$	»
ГТИ-6	Галогенный	$1 \cdot 10^{-7}$ $7 \cdot 10^{-9}$	С атмосферным датчиком С вакуумным датчиком при быстрой откачке 1 дм ³ /с
И043.009	Искровой	$7 \cdot 10^{-8}$	Испытание вакуумных систем со стеклянными элементами
13ТЭ-9-001	Электронно-захватный	$7 \cdot 10^{-10}$	Атмосферный датчик
ТП7101	Катарометрический	$2 \cdot 10^{-6}$	То же

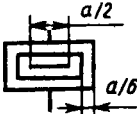
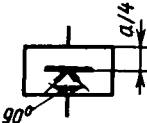
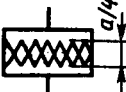

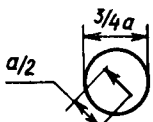




Характеристики измерителей парциальных давлений


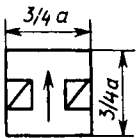
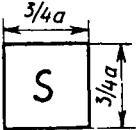
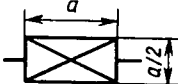
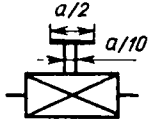
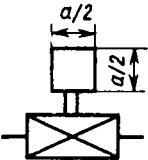
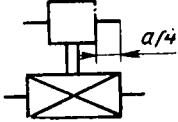
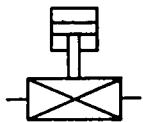
Типы измерителей парциальных давлений	Обозначение	Разрешающая способность	Диапазон масс, а. е. м.	Диапазон рабочих давлений, Па
Циклотронный (омегатрон)	МХ4301	25	1—100	$1 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-8}$
	ИПДО-1	20	2—100	$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-8}$
	ИПДО-2	35	1—250	$1 \cdot 10^{-3} \dots 7 \cdot 10^{-9}$
Радиочастотный (топатрон)	МХ-6401	50	1—56	$1 \cdot 10^{-2} \dots 7 \cdot 10^{-7}$
Времяпролетный (хронотрон)	РМС-2М	45	2 ... 200	$1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-6}$
	МСХ-3А	30	1 ... 250	$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-7}$
Линейный резонансный (фарвитрон)	АПДП-2	20	2 ... 200	$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-7}$
	МХ7301	200	1 ... 200	$1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-8}$
Радиочастотный однополярный	АПДМ-1	400	1 ... 400	$7 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-11}$
	ЭФМ-1	50	1 ... 100	$1 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10^{-7}$
	КМ-2	300	2 ... 300	$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-7}$
Квадрупольный	МСХ-2М	100	1 ... 250	$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-7}$
	МСХ-4	100	1 ... 600	$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-6}$
Статический	МСД-1	60	2 ... 150	$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-8}$
	МХ-1304	100	1 ... 120	$1 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^{-7}$
	МХ-1306	800	2 ... 900	$1 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^{-7}$

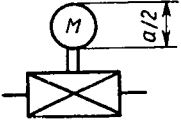
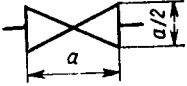



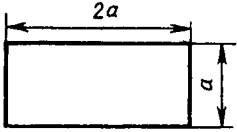
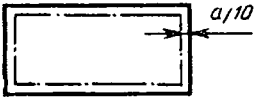



Условные обозначения элементов вакуумных систем

Элементы вакуумной системы	Обозначения	
	графическое	текстовое
Насос вакуумный (общее обозначение)		<i>N</i>
Вращательный		<i>NL</i>
Двухроторный		<i>NZ</i>
Турбомолекулярный		<i>NR</i>
Водокольцевой		<i>NW</i>
Эжекторный		<i>NH</i>
Диффузионный		<i>ND</i>

Элементы вакуумной системы	Обозначения	
	графическое	текстовое
Адсорбционный		NA
Геттерный		NG
Криосорбционный		NC
Ионно-сорбционный		NE
Магниторазрядный		NM
Ловушка (общее обозначение)		B
Охлаждаемая жидкостью, проточная		BW
Охлаждаемая воздухом		BA

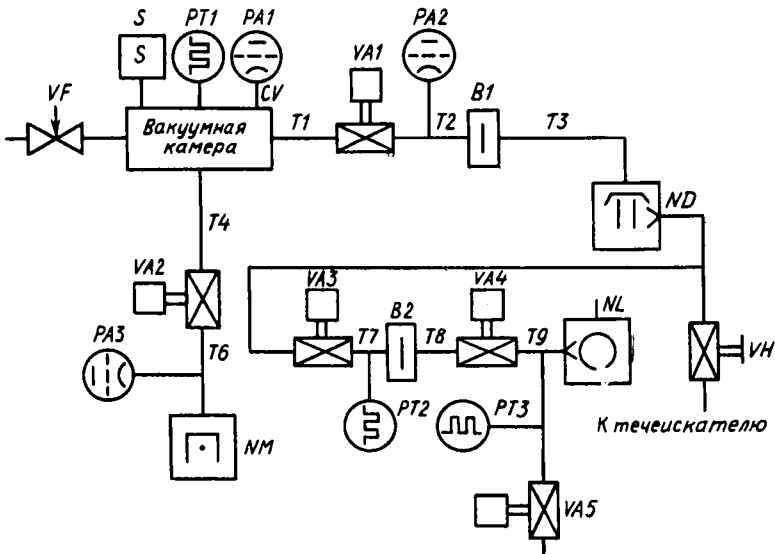
Элементы вакуумной системы	Обозначения	
	графическое	текстовое
Заливная		BL
Термоэлектрическая		BT
Сорбционная		BS
Ионная		BE
Манометрический преобразователь (общее обозначение)		P
Деформационный		PD
Жидкостный		PL
Ионизационный		PA
Магнитный		PM

Элементы вакуумной системы	Обозначения	
	графическое	текстовое
Тепловой		PT
Течеискатель (общее обозначение)		G
Масс-спектрометр		S
Клапан (общее обозначение)		V
Клапан с ручным приводом		VH
Клапан с дистанционным управлением		VA
Клапан с электромагнитным приводом		VE
Клапан с пневматическим или гидравлическим приводом		VP

Элементы вакуумной системы	Обозначения	
	графическое	текстовое
Клапан с электромашинным приводом		VM
Клапан проходной		VR
Клапан угловой		VN
Клапан трехходовой		VT
Натекатель		VF
Камера вакуумная (общее обозначение)		CV
Прогреваемая часть вакуумной системы		CT
Трубопровод (общее обозначение)		T
Трубопровод прямой		TR
Колено		TN

Элементы вакуумной системы	Обозначения	
	графическое	текстовое
Тройник		ТТ
Крестовина		ТК
Гребенка		ТГ

Пример изображения принципиальной вакуумной схемы



VF	Нагреватель НК-20(ОТ 4.463.225ТУ)	1	
VA5	Клапан Ду 16(АН)-1	1	$U = 4 \text{ л/с}$
VA3,VA4,VA1	Клапан Ду 16(АН)-2	3	$U = 4 \text{ л/с}$
VA2	Затвор ЗЭПМ-100(ПБЩМО.336.001ТУ)	1	$U = 3340 \text{ л/с}$
VA1	Клапан КЭУ-63(ОТМО.336.015ТУ)	1	$U = 170 \text{ л/с}$
T7...T9	Трубопровод Ду 10(ОСТ 11.868.005-74)	3	$L = 50 \text{ мм}$
T4, T6	Трубопровод Ду 160(ОСТ 11.868.010-74)	2	$L = 200 \text{ мм}$
T1...T3	Трубопровод Ду 63(ГОСТ 24935-81)	3	$L = 200 \text{ мм}$
S	Анализатор омегаэлектронный РМО-4С	1	
PT1...PT3	Преобразователь терморезистивный ПМТ-2	3	
PA2...PA3	Преобразователь ионизационный ПМИ-12	2	
PA1	Преобразователь ионизационный ПМИ-2	1	
NM	Насос НМД-0,25	1	$S = 250 \text{ л/с}$
NL	Насос ЗНВР-1Д	1	$S = 1 \text{ л/с}$
ND	Насос НТС2	1	$S = 100 \text{ л/с}$
CV	Камера вакуумная $\phi 500, L=500$	1	$V = 100 \text{ л}$
B2	Ловушка ЛС1Т-25	1	$U = 2 \text{ л/с}$
B1	Ловушка ЛС1Т-63	1	$U = 10 \text{ л/с}$
Обозначение	Наименование	Кол.	Примечания

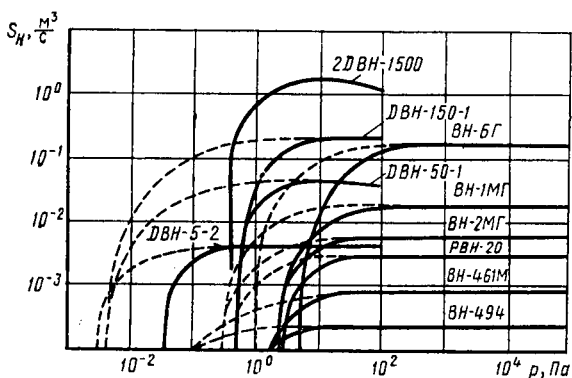


Рис. П.1. Характеристики объемных вакуумных насосов:

———— без ловушки; - - - - с ловушкой

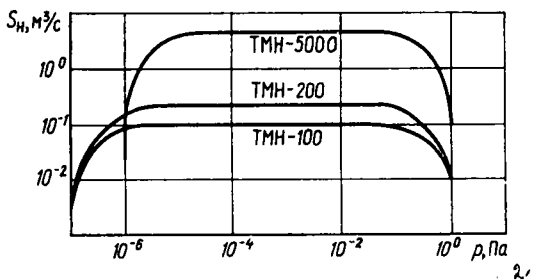


Рис. П.2. Характеристики турбомолекулярных насосов

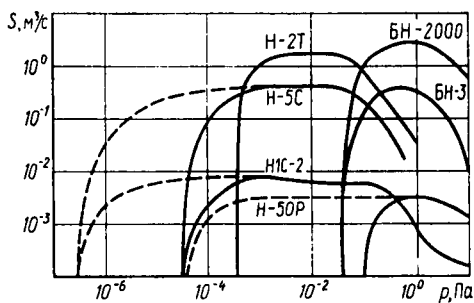


Рис. П.3. Характеристики пароструйных насосов:

— без ловушки; - - - с ловушкой

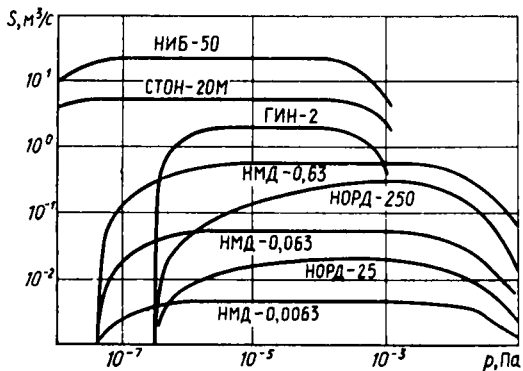


Рис. П.4. Характеристики ионно-сорбционных насосов

ЛИТЕРАТУРА

1. Вакуумная техника: Справочник/Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев, А. Т. Александрова и др. — М.: Машиностроение, 1985. — 360 с.
2. Востров Г. А., Розанов Л. Н. Вакуумметры. — Л.: Машиностроение, 1967. — 235 с.
3. Кузьмин В. В., Левина Л. Е., Творогов И. В. Вакуум-метрическая аппаратура техники высокого вакуума и течеискания. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.
4. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. Основы конструирования вакуумных систем. — М.: Энергия, 1971. — 392 с.
5. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. — М.: Мир, 1964. — 715 с.
6. Минайчев В. Е. Вакуумные крионасосы. — М.: Энергия, 1976. — 152 с.
7. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. — М.: Энергия, 1979. — 504 с.
8. Розанов Л. Н. Вакуумные машины и установки. — Л.: Машиностроение, 1975. — 336 с.
9. Саксаганский Г. Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. — М.: Атомиздат, 1980. — 216 с.
10. Фролов Е. С. Турбомолекулярные вакуум-насосы. — М.: Машиностроение, 1980. — 119 с.
11. Цейтлин А. Б. Пароструйные вакуумные насосы. — М.—Л.: Энергия, 1965. — 400 с.

ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

<p><i>a</i> — количество адсорбированного газа</p> <p><i>C</i> — Постоянная Сюзерленда</p> <p><i>D</i> — коэффициент диффузии</p> <p><i>d</i> — диаметр молекулы</p> <p><i>E</i> — тепловой поток</p> <p><i>e</i> — степень черноты</p> <p><i>F</i> — сила</p> <p><i>G</i> — массовый поток газа</p> <p><i>g</i> — ускорение земного притяжения, $g=9,80665 \text{ м/с}^2$</p> <p><i>l</i> — энтальпия</p> <p><i>Kn</i> — критерий Кнудсена</p> <p><i>k</i> — молекулярная газовая постоянная, $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$</p> <p><i>L</i> — средняя длина свободного пути</p> <p><i>M</i> — молекулярная масса газа</p> <p><i>m</i> — масса молекулы</p> <p><i>N</i> — молекулярный поток газа</p> <p>N_A — число Авогадро, $N_A=6,02 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$</p> <p>$Nu$ — критерий Нуссельта</p> <p><i>n</i> — молекулярная концентрация газа</p> <p><i>p</i> — давление газа</p> <p><i>R</i> — универсальная газовая постоянная, $R=8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)}$</p>	<p><i>Re</i> — критерий Рейнольдса</p> <p><i>q</i> — электрический заряд</p> <p><i>Q</i> — газовый поток в условных единицах</p> <p><i>S</i> — быстрота откачки</p> <p><i>s</i> — растворимость газа в твердых телах</p> <p><i>t</i> — время</p> <p><i>T</i> — абсолютная температура</p> <p><i>v</i> — скорость молекул газа</p> <p><i>V</i> — объем</p> <p><i>W</i> — мощность</p> <p><i>U</i> — проводимость элемента вакуумной системы</p> <p><i>Z</i> — сопротивление элемента вакуумной системы</p> <p>α — коэффициент аккомодации</p> <p>γ — вероятность конденсации молекул</p> <p>η — коэффициент динамической вязкости</p> <p>λ — коэффициент теплопроводности газа</p> <p>ρ — плотность газа</p> <p>ω — телесный угол</p>
---	---

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

<p>Абсорбция 24</p> <p>Авогадро 12</p> <p>Адсорбат 24</p> <p>Адсорбент 24</p> <p>Адсорбция</p> <ul style="list-style-type: none"> — физическая 24 — мономолекулярная 35 — полимолекулярная 34 <p>Бар 13</p> <p>Больцман 12, 19</p> <p>Блистер-эффект 132</p> <p>Быстрота откачки 79</p> <ul style="list-style-type: none"> — действия 79 — геометрическая 83 — эффективная 79 <p>Бурдон 137</p> <p>Вакуум низкий 22</p> <ul style="list-style-type: none"> — средний 23 — высокий 23 <p>Вероятность конденсации 32</p> <p>Водородная «болезнь» 254</p> <p>Время адсорбции 28</p>	<p>Газ балластный 95</p> <p>Газоанализатор времяпролетный 163</p> <ul style="list-style-type: none"> — динамический 157 — квадрупольный 165 — магнитный 158 — монополярный 165 — омегатронный 161 — статический 157 <p>Газовыделение диффузионное 199, 235</p> <ul style="list-style-type: none"> — десорбционное 234 <p>Газопроницаемость 40, 197, 238</p> <p>Геде 5</p> <p>Гей-Люсак 12</p> <p>Герметичность 182</p> <p>Гигроскопатор 209</p> <p>Градуировка преобразователей об- щих давлений 153</p> <ul style="list-style-type: none"> — парциальных давлений 167 <p>Давление запуска 81</p> <ul style="list-style-type: none"> — наибольшее выпускное 82 — — рабочее 81
--	---

- наименьшее рабочее 80
- предельное 80
- Дальтон 11
- Десорбция 24, 42
- Диффузия 52
- Закон Бойля—Мариотта 12
 - косинусный 33
- Затвор 286
- Измерение газовых потоков 173
- Изотерма адсорбции 34
 - s-образна 35
- Испаритель прямоканальный 119
 - подогревный 119
 - электронно-лучевой 119
 - дуговой 119
- Керамика алундовая 255
 - стеатитовая 255
 - форстеритовая 255
- Клей эпоксидный 258
- Кнудсен 6, 22
- Концентрация газа 9
- Коэффициент адсорбируемости 123
 - аккомодации 48
 - диффузии 53
 - захвата 70
 - использования насоса 80
 - компрессии 97, 106
 - подачи 83
 - относительной чувствительности 148
 - стоимостной 203
 - угловой 68
 - чувствительности 146, 150, 152
- Лэнгмюр 6, 35
- Ловушка адсорбционная 93
 - ионная 93
 - конденсационная 111
 - механическая 93
 - сорбционная 112
- Масло вакуумное 90, 109, 299
- Масс-спектрометр 158
- Манометрический преобразователь гидростатический 139
 - деформационный 137
 - компрессорный 140
 - магнитный 149
 - мембранный 138
 - радиозотопный 151
 - тепловой 141
 - электронный 145
- Моделирование имитационное 73
- Насос бустерный 108
 - вакуумный 79
 - диффузионный 102
 - двухроторный 91
 - жидкостно-кольцевой 87
 - золотниковый 89
 - ионно-сорбционный 132
 - криосорбционный 129
 - магниторазрядный 133
 - механический 81
 - молекулярный 95, 99
 - пароструйный 109
 - пластинчато-роторный 88
 - пластинчато-статорный 89
 - поршневой 86
 - ротационный 88
 - турбмолекулярный 101
 - фракционирующий 110
 - эжекторный 102
- Натекание 182
- Натекатель 286
- Нестабильность аргонная 135
- Нуссельт 47
- Оже-спектрометрия 171
- Откачка ионная 116
 - криадсорбционная 123
 - криоконденсационная 121
 - молекулярная 95
 - объемная 82
 - пароструйная 102
 - хемосорбционная 117
- Паскаль 12
- Пайка мягкая 258
 - твердая 258
- Пеннинг 149
- Пицени 258
- Плотность газа 11
- Проводимость 57
- Производительность насоса 79
- Поток газа массовый 56
 - прямой 83
 - обратный 83
 - условный 57
- Рамзай 30, 258
- Разрешающая способность 156
- Расчет вакуумной системы провечный 214, 246
 - проектировочный 218, 247
 - времени откачки 240
 - централизованный систем 231
 - форвакуумного баллона 245
- Растворимость газов 38
- Режим течения молекулярный 58
 - квазистационарный 234
 - молекулярно-вязкостный 58
 - вязкостный 58
 - нестационарный 234
 - стационарный 186
- Резина белая 257
 - черная 257
- Рейнольдс 58

- Сварка газовая 264
 - газодуговая в защитной среде 264
 - диффузионная 264
 - холодная 264
 - электродуговая 264
 - электронно-лучевая 264
- Силикагель 130
- Сильфон 265, 278, 283
- Скорость газовых молекул 14
 - испарения 32
 - конденсации 32
 - адсорбции 41
- Совместность работы насосов 196
- Соединения металлической прокладкой 272
 - резиновой прокладкой 269
 - разборные 266
 - фторопластовым уплотнителем 272
- Сопротивление трубопровода 57
- Сорбция 24
- Спаи металла со стеклом согласованные 261
 - несогласованные 262
- Средняя длина свободного пути 19
- Степень покрытия поверхности 41
- Степень черноты 48
- Схема вакуумная 205, 317
 - принципиальная 205
 - типовая 205
 - централизованная 211
- Сюзерленд 20
- Теплоемкость газа 47
- Теплообмен 46
- Теплота испарения 26
 - миграции 27
 - хемосорбции 26
 - физической адсорбции 26
- Теченскание высокочастотным разрядом 181
 - люминесцентным методом 181
 - пробным газом 178
 - пузырьковым методом 181
 - радиоизотопным методом 181
- Теченскатель масс-спектрометрический 183
 - галогенный 185
- Течь 177
- Торр 13
- Тройная точка 29
- Трубопровод эквивалентный 190
- Уголь активный 130
- Уравнение газового состояния 11
 - вакуумной техники основное 80
- Условие нестационарности потока 234
- Устройство для передачи в вакуум вращательного 280
 - возвратно-поступательного 281
 - качательного 283
- Френдлих 242
- Фоторопласт 256
- Хемосорбция 26
- Цеолит 130
- Энергия
 - взаимодействия двух молекул 24
 - взаимодействия молекулы с поверхностью 25
 - ионизации 51
- Электрические вводы высоковольтные 286
 - сильноточные 285
 - термодарные 285
- Эффекты взаимодействия молекул
 - дисперсионный 24
 - индукционный 24
 - ориентационный 24

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Введение	5
§ В.1. История развития вакуумной техники	5
§ В.2. Применение вакуума в науке и технике	7
 Глава 1. Физика вакуума	 9
§ 1.1. Понятие о вакууме и давлении	9
§ 1.2. Газовые законы	11
§ 1.3. Частота соударений молекул газа с поверхностью и единицы давления	12
§ 1.4. Распределение молекул газа по скоростям	13
§ 1.5. Атмосферное давление	18
§ 1.6. Средняя длина свободного пути	19
§ 1.7. Понятие о степенях вакуума	22
Контрольные вопросы	23
 Глава 2. Сорбционные явления в вакууме	 23
§ 2.1. Энергия взаимодействия	23
§ 2.2. Время адсорбции	28
§ 2.3. Конденсация и испарение	29
§ 2.4. Адсорбция газов и паров	34
§ 2.5. Растворимость газов в твердых телах	38
§ 2.6. Степени покрытия поверхности	41
Контрольные вопросы	43
 Глава 3. Физические процессы в вакууме	 43
§ 3.1. Вязкость газов	43
§ 3.2. Перенос теплоты в вакууме	46
§ 3.3. Электрические явления в вакууме	50
§ 3.4. Диффузия в газах	52
§ 3.5. Режимы течения газов	56
§ 3.6. Расчет характеристик течения газа методами механики сплош- ной среды	59
§ 3.7. Течение газов через отверстия	60
§ 3.8. Течение газов в трубопроводах	63
§ 3.9. Расчет молекулярных потоков методом угловых коэффициентов	68
§ 3.10. Имитационное моделирование молекулярных потоков	73
Контрольные вопросы	78

Глава 4. Механические методы получения вакуума	79
§ 4.1. Общая характеристика вакуумных насосов	79
§ 4.2. Механические вакуумные насосы	81
§ 4.3. Объемная откачка	82
§ 4.4. Конструкции объемных насосов	86
§ 4.5. Молекулярная откачка	95
§ 4.6. Конструкции молекулярных насосов	99
§ 4.7. Пароструйная откачка	102
§ 4.8. Конструкции пароструйных насосов	108
Контрольные вопросы	114
Глава 5. Физико-химические методы получения вакуума	115
§ 5.1. Общая характеристика	115
§ 5.2. Ионная откачка	116
§ 5.3. Хемосорбционная откачка	117
§ 5.4. Конструкции испарительных насосов	119
§ 5.5. Криоконденсационная откачка	121
§ 5.6. Криoadсорбционная откачка	123
§ 5.7. Конструкции криогенных насосов	128
§ 5.8. Ионно-сорбционная откачка	131
§ 5.9. Конструкции ионно-сорбционных насосов	132
Контрольные вопросы	136
Глава 6. Измерение общих давлений	136
§ 6.1. Классификация методов и приборов для измерения общих давлений	136
§ 6.2. Деформационные преобразователи	137
§ 6.3. Гидростатические преобразователи	139
§ 6.4. Тепловые преобразователи	141
§ 6.5. Электронные преобразователи	145
§ 6.6. Магнитные преобразователи	149
§ 6.7. Радионуклидные преобразователи	151
§ 6.8. Градуировка преобразователей для измерения общих давлений	153
Контрольные вопросы	155
Глава 7. Измерение парциальных давлений	155
§ 7.1. Методы измерения	155
§ 7.2. Магнитный газоанализатор	158
§ 7.3. Панорамный газоанализатор	160
§ 7.4. Циклотронный газоанализатор (омегатрон)	161
§ 7.5. Времяпролетные газоанализаторы	163
§ 7.6. Электрические фильтры масс	165
§ 7.7. Градуировка ионизационных газоанализаторов	167
§ 7.8. Термодесорбционный масс-спектрометр	170
§ 7.9. Оже-спектрометр	171
Контрольные вопросы	172
Глава 8. Измерение газовых потоков	173
§ 8.1. Методы измерения газовых потоков	173
§ 8.2. Методы течения	178
§ 8.3. Требования к герметичности вакуумных систем	182
§ 8.4. Аппаратура для определения герметичности	183
Контрольные вопросы	185

	<i>Стр.</i>
Глава 9. Стационарный режим работы вакуумных систем	186
§ 9.1. Распределение давления в вакуумной системе	186
§ 9.2. Соединения арматуры и откачиваемых объектов	188
§ 9.3. Соединения насосов	192
§ 9.4. Расчет газовых нагрузок	197
§ 9.5. Выбор коэффициента использования насоса при стационарном режиме работы	201
§ 9.6. Типовые схемы вакуумных установок	205
§ 9.7. Проверочный расчет вакуумной системы в стационарном режиме работы	214
§ 9.8. Пример проверочного расчета вакуумной системы в стационарном режиме работы	217
§ 9.9. Проектировочный расчет вакуумной системы в стационарном режиме работы	218
§ 9.10. Пример проектировочного расчета вакуумной системы в стационарном режиме работы	222
§ 9.11. Расчет централизованных вакуумных систем	231
Контрольные вопросы	233
Глава 10. Нестационарный режим работы вакуумных систем	233
§ 10.1. Условия квазистационарности	233
§ 10.2. Расчет газовых нагрузок	234
§ 10.3. Расчет времени откачки сосредоточенных объектов	240
§ 10.4. Расчет времени откачки распределенных вакуумных объектов	244
§ 10.5. Расчет форвакуумных баллонов	245
§ 10.6. Методика проверочного расчета	246
§ 10.7. Методика проектировочного расчета	247
Контрольные вопросы	250
Глава 11. Конструирование вакуумных систем	250
§ 11.1. Конструкционные вакуумные материалы	250
§ 11.2. Вакуумно-герметичная пайка	258
§ 11.3. Сварные герметичные соединения	264
§ 11.4. Разборные вакуумные соединения	266
§ 11.5. Вакуумные трубопроводы	276
§ 11.6. Устройства для передачи движения в вакуум	279
§ 11.7. Электрические вакуумные вводы	285
§ 11.8. Вакуумные затворы	286
Контрольные вопросы	292
Заключение	292
Приложения	294
Литература	314
Обозначения основных физических величин	315
Предметный указатель	315