

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

А.В. Юрьева

Расчёт вакуумных систем

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2012

УДК 621.52.001 (075.8)
ББК 31.77Я73
Ю851

Юрьева А.В.

Ю851 Расчёт вакуумных систем: учебное пособие/ А.В. Юрьева; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 114 с.

В пособии изложены основные понятия вакуумной техники, современные средства получения и измерения вакуума. Приведены физико-механические характеристики материалов, применяемых для изготовления элементов вакуумных систем. Рассмотрена методика расчета вакуумных систем, сопровождаемая практическими примерами. Учебное пособие имеет методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Предназначено для студентов и магистрантов, обучающихся по специальности 011200 «Физика».

УДК 621.52.001 (075.8)
ББК 31.77Я73

Рецензенты

Доктор физико-математических наук, профессор ТУСУРа
С.В. Смирнов

Кандидат технических наук
научный сотрудник
Института сильноточной электроники СО РАН
С.В. Работкин

© ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2012
© Юрьева А.В. 2012
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2012

Введение

Вакуумная техника – прикладная наука, изучающая проблемы получения и поддержания вакуума, проведения вакуумных измерений, а также вопросы разработки, конструирования и применения вакуумных систем и их функциональных элементов. В технике вакуум создают с помощью вакуумных насосов различных принципов действия.

Понятие «вакуум» (от лат. *vacuum* - пустота) имеет три различных значения – для техники, космических исследований и физики.

В космических исследованиях на высоте 50 000 км над поверхностью Земли давление составляет около 10^{-19} Па, т.е. концентрация молекул равна примерно четырем штукам в 1 см^3 . Такая концентрация уже близка к состоянию космического вакуума. В околоземном межпланетном пространстве концентрация атомов порядка нескольких штук в 1 см^3 . В основном они являются компонентами солнечного ветра и поэтому ионизированы. В межзвездном пространстве, вне газовых облаков, концентрация атомов в десять раз меньше. Внутри газовых облаков она примерно такая же, как в межпланетном пространстве. Таким образом, с учетом существования космической пыли, космический вакуум – это отнюдь не пустота.

Физическим вакуумом называется пространство, в котором отсутствуют частицы вещества, и установилось низшее энергетическое состояние. Однако в вакууме экспериментально обнаружены рождающиеся и тут же исчезающие виртуальные элементарные частицы, влияющие на протекающие физические процессы.

В технике вакуумом называется состояние газа, при котором его давление ниже атмосферного. Количественной характеристикой вакуума служит абсолютное давление. Единицей измерения давления в системе СИ является 1 Па.

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

Низкий вакуум характеризуется давлением газа, при котором средняя длина свободного пути молекул газа значительно меньше характерного линейного размера сосуда, существенного для рассматриваемого процесса ($\lambda \ll L$). Низкому вакууму обычно соответствует область давлений от 10^5 до 100 Па.

Средний вакуум характеризуется давлением газа, при котором средняя длина свободного пути молекул соизмерима с характерным линейным размером ($\lambda \approx L$). Среднему вакууму обычно соответствует область давлений от 100 до 0,1 Па.

Высокий вакуум характеризуется давлением газа, при котором средняя длина свободного пути молекул значительно превышает характерный линейный размер ($\lambda \gg L$). Высокому вакууму обычно соответствует область давлений от 0,1 до 10^{-5} Па.

Сверхвысокий вакуум характеризуется давлением газа, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа, за время, существенное для рабочего процесса. Сверхвысокому вакууму обычно соответствует область давлений менее 10^{-5} Па.

Необходимость вакуума надо рассматривать, исходя из требований для протекающих процессов.

В электронной технике вакуум является необходимым для работы осветительных ламп, генераторных и СВЧ-приборов, телевизоров и рентгеновских трубок. В производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем широко используют вакуумные технологии для нанесения тонких пленок.

В машиностроении сварка в вакууме позволяет соединить керамику с металлом, сталь с алюминием, что невозможно в обычных условиях. В вакууме осуществляется нанесение упрочняющих покрытий на режущий инструмент, износостойких покрытий на детали машин.

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

В легкой промышленности напылением в вакууме металлизуют пластмассу, фольгу, бумагу и ткани для получения декоративных покрытий.

В пищевой промышленности для длительного хранения и консервирования пищевых продуктов используется вакуумная сушка вымораживанием. Выпаривание в вакууме применяют при производстве сахара, при опреснении воды, солеварении. Также используют вакуумные упаковки.

В медицине вакуум применяют для сохранения лекарств, при получении ряда препаратов, в хирургии его используют для заживления ран и т.д.

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

Учебное пособие охватывает все основные разделы вакуумной техники. Первая часть пособия посвящена общей характеристике получения и измерения вакуума и содержит следующие разделы:

- теоретические основы вакуумной техники;
- механические методы получения вакуума;
- физико-химические методы получения вакуума;
- методы измерения вакуума;
- вакуумные системы и их элементы.

Во второй части учебного пособия особое внимание уделено методике расчета вакуумных систем и приведены примеры расчета различных узлов.

В третьей части пособия содержатся методические указания по самостоятельной работе студентов, индивидуальные задания и задачи для аудиторных практических занятий.

Учебное пособие снабжено приложениями, необходимыми для выполнения практических и индивидуальных заданий.

Часть I Техника получения и измерения вакуума

1. Теоретические основы вакуумной техники

1.1 Общие сведения

Вакуумная система – совокупность взаимосвязанных устройств для создания, повышения и поддержания вакуума, приборов для вакуумных измерений, а также откачиваемых сосудов и связывающих их вакуумных трубопроводов.

Элемент вакуумной системы – прибор, сборочная единица или деталь, предназначенные для выполнения определенных функций в вакуумной системе.

Откачка – уменьшение молекулярной концентрации газа при помощи устройств, удаляющих или поглощающих газ.

Остаточный газ – газ, оставшийся в вакуумной системе после откачки.

Разреженный газ – газ, молекулярная концентрация которого меньше его концентрации при нормальных условиях.

Форвакуум – предварительный вакуум (до 0,1 Па), создаваемый насосом более низкого вакуума перед подключением высоковакуумного насоса.

Вакуумный насос – устройство, предназначенное для создания, повышения и (или) поддержания вакуума.

Вакуумный насос предварительного разрежения (форвакуумный насос) – вакуумный насос, предназначенный для понижения давления в откачиваемом объеме или откачной системе от атмосферного давления до значения, при котором может начать работу другая откачная система или вакуумный насос.

Низковакуумный насос – вакуумный насос, предназначенный для получения давления в откачиваемом объеме в диапазоне от 10^5 до 0,1 Па.

Высоковакуумный насос – вакуумный насос, предназначенный для получения давления в откачиваемом объеме менее 0,1 Па.

Манометр – прибор для измерения давлений или разности давлений.

Вакуумметр – манометр для измерения давления разреженного газа или пара.

Термопарный вакуумметр – тепловой вакуумметр полного давления, в котором использована зависимость электродвижущей силы термопары от измеряемого давления.

Ионизационный вакуумметр – вакуумметр полного давления, действие которого основано на зависимости ионного тока, возникшего в газе в результате ионизации молекул разреженного газа, от давления.

Ловушка – устройство, в котором парциальное давление компонентов газопаровой смеси понижается механическим, физическим или химическим способом, и уменьшается проникновение паров или газов из одной части откачной системы в другую.

1.2 Основное уравнение вакуумной техники

Рассмотрим простейшую вакуумную систему, изображенную на рис. 1, которая состоит из откачиваемого объема 1, манометрических преобразователей p_1 и p_2 , трубопровода 2 и откачного средства 3.

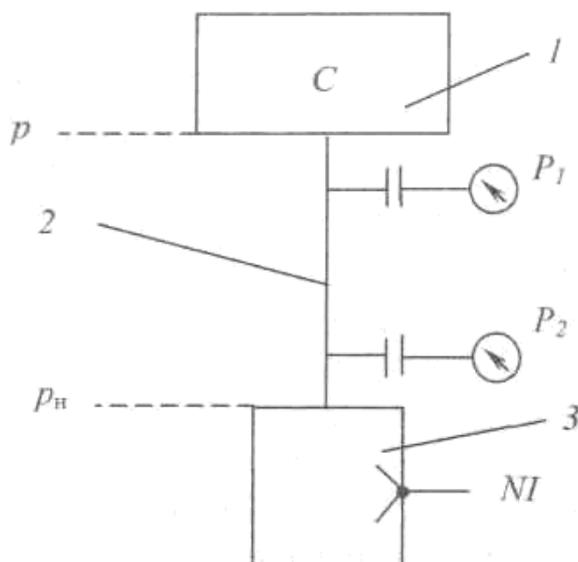


Рис. 1 Простейшая вакуумная система:

1 — камера вакуумная; 2 — трубопровод; 3 — механический вакуумный насос;
 $p_{1,2}$ — вакуумметры [1]

Если вакуумная система герметична (отсутствие натекания), то до начала работы насоса давление во всей вакуумной системе одинаково.

С началом работы насоса начинается перемещение газа из камеры 1 по трубопроводу 2 в насос 3, причем количество газа в вакуумной

системе непрерывно уменьшается, происходит понижение давления в вакуумной системе. Давление p_n на входе в насос становится ниже, чем давление p на выходе из откачиваемой камеры 2. Таким образом, создается разность давлений $p - p_n$, которая обусловлена наличием в системе трубопроводов, кранов и других элементов, оказывающих сопротивление прохождению потока газа. Разность $p - p_n$ принято называть движущей разностью давлений.

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

Быстротой откачки объема или *эффективной быстротой откачки* S_0 называется объем газа, поступающий в единицу времени из сосуда в трубопровод при данном давлении p в откачиваемом объеме. По определению $S_0 = dV/dt$ при данном давлении p в сосуде.

Быстротой действия вакуумного насоса S_H при данном впускном давлении P_n называется объем газа, поступающий в работающий насос в единицу времени при этом давлении $S_H = dV_n/dt$.

По аналогии с S_0 и S_H можно говорить, что быстрота действия откачки вакуумной системы в любом сечении трубопровода $S_i = dV_i/dt$ при давлении p_i причем dV_i – объем газа, проходящий через сечение трубопровода за промежуток времени dt и измеряемый при том же давлении p_i .

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

$$Q_i = p_i \cdot S_i \quad (1.1)$$

Это количество газа принято называть *потоком газа в данном сечении трубопровода*. Обычно поток газа измеряется в следующих единицах: $p \cdot V/t = \text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

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

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

$$Q_i = Q_H = p_H \cdot S_H = p \cdot S_0$$

При расчетах вакуумных систем чаще пользуются величиной проводимости трубопровода U :

$$U = \frac{Q}{p - p_H} \quad (1.2)$$

Проводимость U измеряется обычно в м³/с или л/с.

Тогда для любой разности давлений $p_1 - p_2$ поток определится как: $Q = U \cdot (p_1 - p_2)$. Установим взаимосвязь между тремя параметрами вакуумной системы: S_0 , S_H и U .

Из уравнения (1) получаем: $S_0 = Q/p_1$, $S_H = Q/p_2$

Получаем *основное уравнение вакуумной техники*:

$$\frac{1}{S_0} - \frac{1}{S_H} = \frac{1}{U} \quad \text{или} \quad S_0 = \frac{S_H \cdot U}{S_H + U} \quad (1.3)$$

Если $U \rightarrow \infty$, то $S_0 \rightarrow S_H$.

Введем в основное уравнение коэффициент использования насоса $K_u = S_0 / S_H$, тогда для расчета можно использовать следующие формулы

$$K_u = \frac{U}{S_H + U}, \quad U = \frac{S_H \cdot K_u}{1 - K_u}, \quad S_H = \frac{S_0}{K_u \cdot (1 - P_{np} / K_u \cdot p)}. \quad (1.4)$$

1.3. Режимы течения газов по трубопроводам

Во время откачки вакуумной системы давление газа в ней обычно уменьшается, и одновременно с этим меняются режимы течения газа в трубопроводах. В вакуумной технике различают три режима течения газов по трубопроводам – вязкостный, молекулярный, молекулярно-вязкостный.

Вязкостный режим течения наблюдается в низком вакууме, когда длина свободного пробега молекул газа λ много меньше диаметра трубопровода d ($\lambda < d$). В этих условиях число столкновений между молекулами намного превышает число ударов о стенки. Газ в целом движется с различной скоростью по поперечному сечению трубопровода.

Молекулярный режим течения газа имеет место в условиях высокого вакуума, когда длина свободного пробега λ много больше диаметра

трубопровода d ($\lambda \gg d$). В этом случае молекулы практически не взаимодействуют друг с другом, а сталкиваются только со стенками трубопровода.

Молекулярно-вязкостный режим реализуется при среднем вакууме ($\lambda \sim d$), когда длина свободного пробега молекул газа соизмерима с диаметром трубопровода.

Для определения режимов течения газа используется *критерий Кнудсена* $K_n = \frac{\lambda}{d}$.

Молекулярный режим течения газа имеет место, когда $K_n = \lambda/d \geq 1/3$ и $\bar{p} \cdot d \leq 0,02 \text{ Па} \cdot \text{м}$.

Для вязкостного режима должно выполняться условие $K_n = \lambda/d \leq 5 \cdot 10^{-3}$, что соответствует $\bar{p} \cdot d \geq 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м}$.

Молекулярно-вязкостный режим будет иметь место при условии $0,02 \leq \bar{p} \cdot d \leq 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м}$.

Более подробно режимы течения газа и расчет проводимости трубопроводов при каждом режиме будут рассмотрены во II части пособия.

1.4 Общая характеристика методов получения вакуума

Когда говорят о вакууме с технической точки зрения, то речь идет об использовании вакуума в широком диапазоне давлений – от атмосферного 10^5 до 10^{-10} Па. Изменение давления на 15 порядков практически невозможно обеспечить при использовании лишь одного насоса, требуются комбинированные средства откачки, включающие в себя насосы различных типов и, следовательно, различные приборы для измерения давлений.

При большом различии в принципах действия и конструкциях, обусловленных многообразием требований к откачному оборудованию, во всех вакуумных насосах для откачки газа используют один из двух способов:

- перемещение газа за счет приложения к нему механических сил в некотором месте вакуумной системы, откуда газ выталкивается;
- связывание газа путем сорбции, химических реакций или конденсации обычно в замкнутой вакуумной системе.

На рисунке 2 приведены диапазоны давлений для различных типов вакуумных насосов.



Рис. 2 Области действия вакуумных насосов

Насосы объемного типа используются для откачки газа в диапазоне от 10^5 до 10^{-1} Па. В этих насосах откачка осуществляется за счет периодического изменения объема рабочей камеры.

Действие механических молекулярных насосов обусловлено переносом газа движущимися поверхностями твердого тела. Диапазон рабочих давлений от 10^2 до 10^{-8} Па.

Пароструйные насосы осуществляют откачку путем сообщения молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости, в направлении откачки непрерывно истекающей струи пара рабочей жидкости. Диапазон рабочих давлений от 10 до 10^{-9} Па.

Сорбционные насосы осуществляют откачку газов за счет их сорбции на поверхности или в объеме твердых тел. Диапазон рабочих давлений от 10^5 до 10^{-6} Па. Действие ионно-сорбционных насосов основано на удалении газов в виде ионов за счет электрического поля и сорбции газов на охлажденных поверхностях. Область рабочих давлений от 10 до 10^{-11} Па.

Криогенные насосы осуществляют откачку путем конденсации откачиваемых газов и паров на поверхностях, охлаждаемых до сверхнизких (криогенных) температур. Разновидностями криогенных насосов являются конденсационные и криосорбционные насосы. Диапазон действий давлений от 10 до 10^{-11} Па.

Для характеристики вакуумных насосов обычно применяют четыре основных параметра:

- быстрота действия насоса S_H ;
- предельное давление насоса p_{np} ;
- давление запуска вакуумного насоса p_3 ;
- наибольшее выпускное давление $p_{вып}$.

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 газовыделением материалов, из которых изготовлен насос, перетеканием газов через зазоры и другими явлениями, возникающими в процессе откачки.

Давление запуска вакуумного насоса $p_з$ – это максимальное давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу.

Наибольшее выпускное давление $p_{вып}$ – максимальное давление в выходном сечении насоса, при котором он может осуществлять работу.

2. Механические методы получения вакуума

2.1 Объемные вакуумные насосы с масляным уплотнением

В процессе *объемной откачки* выполняются следующие основные операции:

- 1) всасывание газа за счет расширения объема рабочей камеры насоса;
- 2) уменьшение объема рабочей камеры и сжатие находящегося в ней газа;
- 3) удаление сжатого газа из рабочей камеры в атмосферу или в насос предварительного разряжения.

Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением относятся к насосам объемного действия и работают за счет периодического изменения объема рабочей камеры. Механические насосы могут быть пластинчато-роторными, пластинчато-статорными и плунжерными (золотниковыми). На рис. 3 приведена схема пластинчато-роторного насоса.

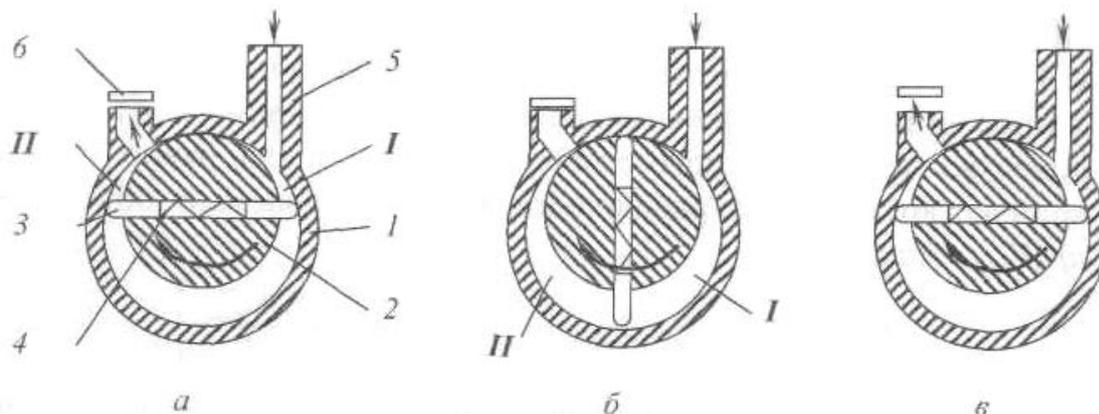


Рис. 3 Схема пластинчато-роторного насоса:

I — полость всасывания; II — полость сжатия; а — начало откачки; б — максимальный объем камеры всасывания; в — окончание цикла; 1 — камера; 2 — ротор; 3 — пластины; 4 — пружина; 5 — впускной патрубок; 6 — клапан.

В цилиндрической камере насоса 1 вращается в направлении, указанном стрелкой, эксцентрично расположенный ротор 2, в прорези которого свободно вставлены пластины 3 с пружиной 4. При вращении ротора пластины скользят по внутренней поверхности цилиндра, и в камере насоса образуются две полости переменного объема: I (полость всасывания) и II (полость сжатия). Полость всасывания I при вращении ротора увеличивает свой объем, и в нее поступает газ из впускного патрубка 5, связанного с откачиваемым сосудом. Объем полости сжатия II, расположенный на выпускной стороне, уменьшается при вращении ротора, и в ней происходит сжатие газа. Эта полость соединена с клапаном 6.

Когда давление газа в полости II станет достаточным для открытия клапана, произойдет выхлоп. В процессе работы зазоры в роторном механизме уплотняются рабочей жидкостью насоса – маслом, благодаря чему обратное перетекание газа с выхода на вход становится малым. Одновременно масло обеспечивает смазку и частичное охлаждение механизма насоса.

Работа объемных вакуумных насосов может сопровождаться рядом нежелательных явлений:

- проникновением паров рабочих жидкостей (масел) из насоса в откачиваемый объем,
- загрязнением насоса откачиваемыми веществами с высоким давлением насыщенных паров,
- потерей рабочей жидкости через выхлопной патрубок,
- утечкой откачиваемого газа и т.д.

Предельное давление объемных насосов также определяется объемом вредного пространства и давлением газа в этом объеме (рис. 4).

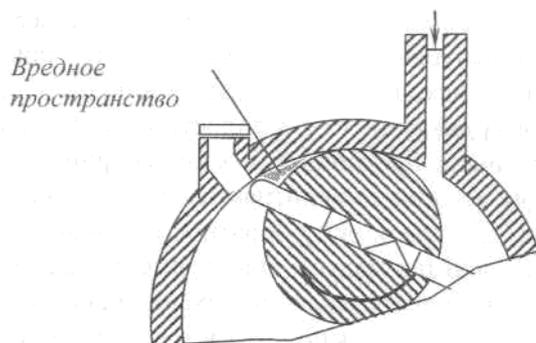


Рис. 4 Вредное пространство пластинчато-роторного насоса [1]

Для одноступенчатых насосов давление газа во вредном пространстве равно атмосферному, поэтому количество газа, которое переносится с выпускной стороны на впускную, будет равно $Q_{обр} = p_0 \cdot V_{вп}$.

В процессе откачки наступает момент, когда прямой поток $Q_{пр}$, обусловленный откачивающим действием насоса, становится равным обратному потоку $Q_{обр}$. Это соответствует получению предельного давления.

Для уменьшения предельного давления насоса необходимо уменьшать объем вредного пространства или давление газа в этом пространстве. Объем вредного пространства уменьшают путем улучшения конструкции насосов, а давление газа – путем использования нескольких ступеней откачки. Для двухступенчатых насосов первая ступень подключается к откачиваемому объему, а вторая ступень является выпускной.

2.2 Объемные безмаслянные насосы

Современные механические объемные насосы осуществляют безмаслянную откачку и работают за счет периодического изменения объема рабочей камеры насоса. Безмаслянные механические насосы могут быть мембранными и спиральными. На рис. 5 приведена схема мембранного насоса.

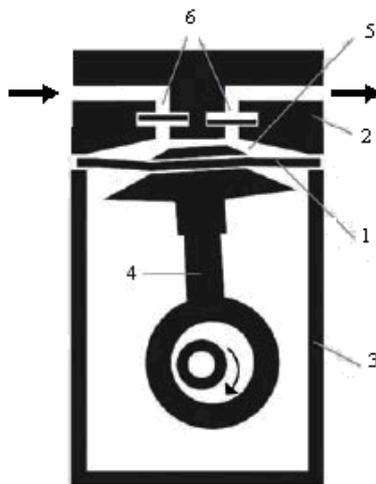


Рис. 5 Схема мембранного насоса:

1 — мембрана; 2 — головка насоса; 3 — камера насоса; 4 — поршень; 5 — камера всасывания; 6 — впускной и выпускной клапаны.

Мембрана из эластомера 1 перемещается вверх и вниз при помощи поршня 4. При движении мембраны вниз, камера всасывания расширяется, вследствие чего газ попадает внутрь камеры через впускной клапан. При движении вверх мембрана выбрасывает газ через выпускной клапан за пределы головки насоса 2. Камера насоса герметично изолирована от приводного механизма посредством мембраны. Таким образом, мембранный насос перемещает, откачивает и сжимает перекачиваемую среду без использования масла.

Мембранные безмасляные вакуумные насосы практичны и многофункциональны.

К их основным преимуществам можно отнести полное отсутствие масла, долгий срок службы, малошумную работу, малые габариты, простоту в использовании.

Спиральные вакуумные насосы предусмотрены для безмасляного получения вакуума на производстве и в лабораториях. Они могут использоваться как отдельно, так и в комбинации с другими насосами.

Процесс откачки в них осуществляется двумя свёрнутыми спиральями, одна из которых неподвижна, а другая колеблется через эксцентрик на валу электродвигателя. Ввиду того, что рабочие элементы этих насосов движутся с низкими линейными скоростями и соприкасаются минимально между собой, они надежны в работе, требуют минимального обслуживания, потребляют мало энергии и работают с низким уровнем шума.

2.3 Молекулярные насосы

В основе работы механических молекулярных насосов используется специфика явления удара молекул газа о поверхность твердого тела. При таком взаимодействии молекулы газа не отражаются мгновенно, а удерживаются на поверхности некоторое малое время. Если скорость движения поверхности больше или равна скорости теплового движения молекул, то молекулы получают переносную скорость в заданном направлении.

Принцип действия простейшего механического молекулярного насоса показан на рисунке 6.

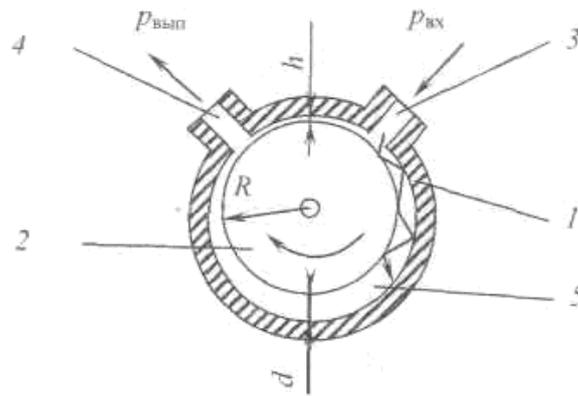


Рис. 6 Схема механического молекулярного насоса:
1 — статор; 2 — ротор; 3 — впускное отверстие; 4 — выпускное отверстие; 5 — канал

В статоре 1 с большой скоростью вращается барабан (ротор) 2 радиусом R . При вращении ротора молекулы газа будут перемещаться от впускного отверстия 3 к выпускному отверстию 4 через рабочий зазор d .

Если скорость вращения ротора равна или больше скорости теплового движения молекул газа, то молекулы будут двигаться в направлении вращения. В области молекулярного режима течения газа насос работает эффективно, т. к. скорость вращения ротора велика, и при каждом втором соударении молекулы газа получают дополнительную составляющую импульса в направлении откачки. При увеличении давления газа эффективность падает, т. к. уменьшается вероятность ударов молекул газа о поверхность ротора. Поэтому для запуска молекулярных насосов требуется предварительное разряжение. Давление запуска можно определить из условия $\lambda \geq d$. Для современных насосов скорость вращения ротора может достигать 10000–40000 об/мин.

Предельное давление для молекулярных насосов:

$$\frac{P_{np}}{P_{вып}} = 1 - F \cdot \frac{v}{2} \cdot \frac{l}{r^3 C_2} \cdot \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (1.5)$$

где P_{np} – предельное давление,

$P_{вып}$ – выпускное давление,

F – площадь поперечного сечения канала,

$\frac{v}{2}$ – средняя переносная скорость молекул,

r, l – радиус и длина канала,

C_2 – постоянная.

Величина, обратная полученному отношению, т.е. $\frac{P_{вып}}{P_{np}}$, называется *коэффициентом компрессии (сжатия)*. Чем выше коэффициент компрессии, тем эффективнее работает насос.

Широкое применение получили турбомолекулярные насосы, которые сочетают в себе принцип молекулярного увлечения и осевого компрессора и напоминают обращенную турбину. Турбомолекулярные насосы имеют много разновидностей и отличаются по своим параметрам.

Турбомолекулярные насосы применяются совместно с механическими вакуумными насосами.

Чтобы насос мог действовать, требуется предварительный вакуум порядка 10 Па, что и обеспечивается форвакуумным насосом.

На рис. 7 представлена схема турбомолекулярного насоса с горизонтальным валом.

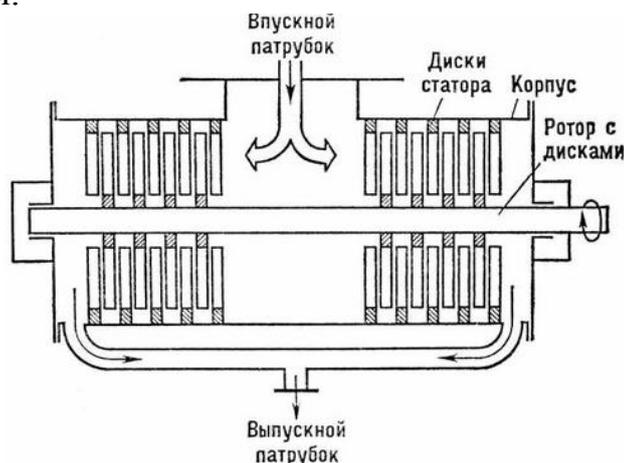


Рис. 7 Схема турбомолекулярного насоса с горизонтальным валом [2]

В корпусе установлены неподвижные статорные диски, между которыми вращаются диски, закрепленные на роторе. Роторные диски вы-

полнены с прорезями. В статорных дисках имеются зеркально расположенные прорези такой же формы. При горизонтальном положении ротора движение газа в насосе после входа во всасывающий патрубок разветвляется на два потока, которые соединяются в выхлопном патрубке.

Быстрота откачки турбомолекулярных насосов слабо зависит от рода газа. Предельное давление насосов находится в пределах $10^{-7} - 10^{-8}$ Па. Наибольшее давление запуска 1-10 Па.

К достоинствам турбомолекулярных насосов относятся достаточно широкий диапазон давлений, быстрый запуск насоса.

Недостатком насоса является быстрый износ подшипников ротора и других подвижных частей насоса, наличие масла, необходимого для смазывания ротора.

Современные турбомолекулярные насосы полностью лишены этих недостатков.

В них нет масел и трущихся частей, что делает их в высшей степени долговечными, надежными, экологически эффективными в работе и сводит к минимуму необходимость какого-либо технического обслуживания. В настоящее время турбомолекулярные насосы имеют магнитную подвеску ротора, так, что контакт между ротором и остальными частями насоса исключен. Наряду с обеспечением очень низкого уровня вибраций, отсутствие контакта означает отсутствие износа подшипников и, как следствие, обслуживания насоса. Использование магнитной подвески позволяет исключить углеводородные смазки, гарантируя, тем самым, отсутствие ухудшения условий вакуумного процесса по вине турбомолекулярного насоса.

2.4 Паромасляные диффузионные насосы

При пароструйной откачке (рис. 8) молекулы 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 5.

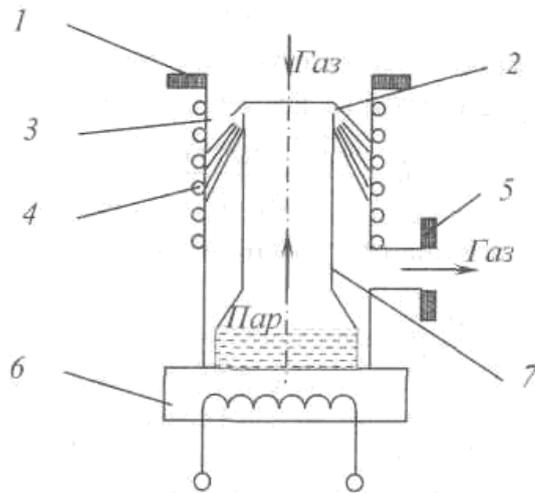


Рис. 8 Схема диффузионного насоса:

1 — входное отверстие; 2 — сопло; 3 — рабочая камера насоса; 4 — охлаждение; 5 — выходной патрубок; 6 — нагреватель; 7 — паропровод [1]

В камере насоса 3 происходит смешение паровой струи, выходящей из сопла 2, и откачиваемого газа. Разделение откачиваемого газа и рабочего пара осуществляется в камере 3 в процессе конденсации рабочего пара на охлажденных поверхностях 4. После чего откачиваемый газ выходит из насоса через выходной патрубок 5, а сконденсировавшийся пар стекает по стенкам холодильника 4 в кипятильник, где вновь испаряется за счет нагревателя 6 и по паропроводу 7 попадает в рабочее сопло 2, обеспечивая непрерывность процесса откачки.

Диффузионные насосы предназначены для работы в области высокого и сверхвысокого вакуума. Паромасляные насосы применяются совместно с механическими вакуумными насосами с масляным уплотнением.

Чтобы диффузионный насос мог действовать, требуется предварительный вакуум порядка 10 Па, что и обеспечивается форвакуумным насосом.

При таком вакууме средний свободный пробег молекулы газа уже достаточно велик для того, чтобы происходила диффузия газа в струю пара и молекулы пара могли без столкновений достигать холодных стенок насоса и конденсироваться.

Взаимодействие откачиваемого газа с паровой струей зависит от степени вакуума. При низком вакууме молекулы, находящиеся в пограничном с паровой струей слое, за счет сил внутреннего трения увлекают другие слои газа. Такие насосы называют *эжекторными*.

В области высокого вакуума механизм увлечения газа обусловлен диффузионными процессами. Вследствие разности концентраций газа над паровой струей и в самой струе (очень мала) происходит диффузия газа в струю. Такие насосы называются *диффузионными*.

Коэффициент сжатия для пароструйных насосов:

$$\frac{p_{\text{вып}}}{p_{\text{пр}}} = \exp\left(\frac{v_{\text{II}} \cdot L}{D_{\text{III}}}\right), \quad (1.6)$$

где v_{II} – скорость струи пара,

L – длина струи пара,

D_{III} – коэффициент диффузии газа через струю пара на выпускную сторону насоса.

$$D_{\text{III}} = \frac{D_0}{n_{\text{II}}}, \quad (1.7)$$

где D_0 – постоянная взаимной диффузии, через нее определяется зависимость параметров насоса от рода газа.

Константа D_0 для легких газов значительно больше, чем для тяжелых. Поэтому степень сжатия и наибольшее выпускное давление $p_{\text{вып}}$ при откачке легких газов будет всегда ниже, чем для тяжелых.

$$D_0 = \frac{3}{8 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot (R \cdot T_{\text{II}} \frac{M_1 + M_2}{M_1 \cdot M_2})^{1/2} \cdot \frac{1}{(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2})^2}, \quad (1.8)$$

где σ_1, σ_2 – диаметр молекул соответственно газа и пара,

M_1, M_2 – молекулярный вес соответственно газа и пара,

R – универсальная газовая постоянная,

T_{II} – температура пара.

Учитывая, что $n_{\text{II}} = \frac{p_{\text{II}}}{k \cdot T_{\text{II}}}$ получаем

$$D_{\text{III}} = 85,1 \cdot 10^{-23} \cdot (\frac{M_1 + M_2}{M_1 \cdot M_2})^{1/2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)^{-2} \cdot T_{\text{II}}^{3/2} \cdot p_{\text{II}}^{-1}, \quad (1.9)$$

где p_{II} – давление пара в струе.

Если рассматривать идеальный случай, когда откачка происходит через щель площадью A , то максимальная быстрота действия насоса будет:

$$S_{\text{H}} = \frac{A \cdot \overline{v_{\text{ap}}}}{4}, \quad (1.10)$$

где $\overline{v_{\text{ap}}}$ – средняя арифметическая скорость молекул газа.

Реальная быстрота действия будет меньше из-за неполного захвата молекул газа паровой струей. Введем коэффициент χ_0 — вакуум-фактор или коэффициент эффективности диффузионной щели:

$$\chi_0 = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{v_{ap}}{v_{\Pi}}} \quad (1.11)$$

Коэффициент χ_0 зависит от рода газа и мощности подогревателя.

Реальная быстрота действия для диффузионной щели в диапазоне давлений, когда она остается постоянной, будет равна:

$$S_H = \frac{A \cdot \overline{v_{ap}}}{4} \cdot \chi_0 \quad (1.12)$$

В области давлений, близких к предельному p_{np} , быстрота действия S_H диффузионного насоса определяется:

$$S_H = \frac{A \cdot \overline{v_{ap}}}{4} \cdot \chi_0 \cdot \left(1 - \frac{p_{np}}{p}\right),$$

где p — рабочее давление.

Конструкции паромасляных диффузионных насосов имеют ряд особенностей, связанных с использованием в качестве рабочих жидкостей масел. Это прежде всего устройства, обеспечивающие фракционирование (т.е. разделение на фракции) неоднородных масел. Эти масла представляют смесь фракций с различным давлением насыщенного пара и различной массой. С учетом этого в насосах предусмотрено фракционирование рабочей жидкости за счет многоступенчатой конструкции насоса.

На рис. 9, а показана схема трехступенчатого насоса, для которого первая ступень является входной, а третья ступень — выходной. Входная ступень определяет предельное остаточное давление и быстроту действия насоса. Плотность струи пара в первой ступени должна быть малой для обеспечения большой скорости диффузии газа в струю. Для выходной ступени, определяющей наибольшее выпускное давление насоса, давление пара рабочей жидкости должно быть, возможно, большим для получения струи высокой плотности.

Фракционирование масла, стекающего в кипятильник по стенке корпуса, осуществляется с помощью лабиринтных колец (рис. 9, б), удлиняющих путь масла до поступления его в центральную зону кипятильника. При этом легкие фракции масла, имеющие низкую температуру кипения, испаряются в наружном кольце лабиринта и поступают в паропровод 3 (рис. 9, а). Тяжелые фракции, имеющие сравнительно высокую температуру кипения, испаряются во внутреннем кольце лаби-

ринта и направляются в высоковакуумную ступень 1. Тяжелые фракции имеют низкое давление насыщенного пара и тем самым обеспечивают низкое предельное давление на входе насоса.

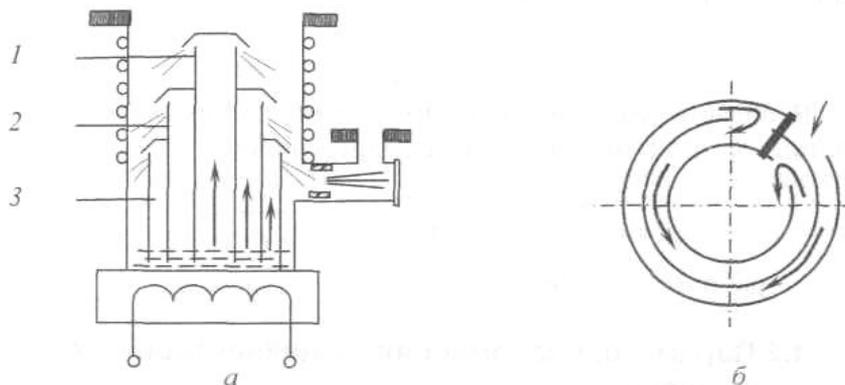


Рис. 9 Трехступенчатый паромасляный диффузионный насос: а — расположение паропроводов; б — система фракционирования.

Основной характеристикой пароструйных насосов является зависимость быстроты действия от давления на входе в насос (рис. 10).

При увеличении рабочего давления за верхнюю границу молекулярного режима течения (область III) быстрота действия уменьшается в связи со снижением скорости диффузии молекул газа в струю пара и при максимальном входном давлении стремится к нулю.

В средней области рабочих давлений II быстрота действия постоянна и равна S_{max} .

При приближения рабочего давления к предельному p_{np} (область I) она стремится к нулю из-за наличия обратного потока газов и паров из насоса в откачиваемый объем. При низких давлениях количество газа, откачиваемого насосом, Q_{np} невелико и соизмеримо с тем количеством газа, которое проникает в откачиваемый объем за счет натекания и газо-выделения, $Q_{обр}$.

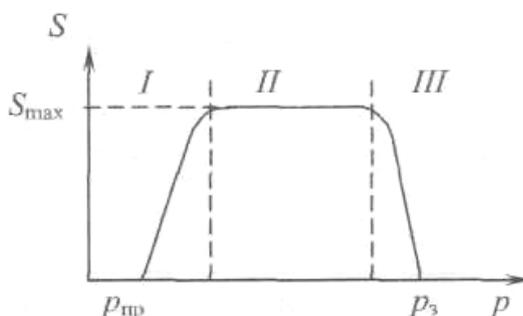


Рис. 10 Зависимость быстроты действия паромасляного диффузионного насоса от впускного давления

Быстрота действия S_H зависит от совокупности изменения следующих параметров: мощности кипятильника, рода газа, температуры газа, рода рабочей жидкости. Мощность кипятильника определяет плотность и скорость струи пара.

Для получения максимальной быстроты действия по различным газам необходимо установить оптимальный режим подогрева для откачки каждого газа (рис. 11)

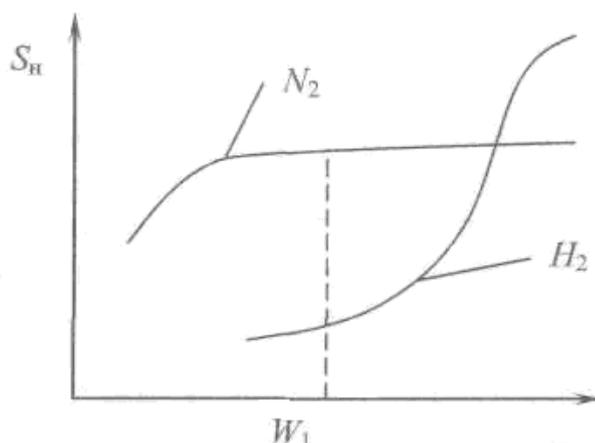


Рис. 11 Зависимость быстроты откачки от мощности кипятильника для разных газов

Например, при постоянной мощности W_1 азот откачивается с максимальной скоростью, а водород практически не откачивается, что приводит на практике к селективности откачки.

Достоинства паромасляных диффузионных насосов: получение высокого вакуума, простота конструкции, большие скорости откачки.

Недостатки: селективность откачки, наличие паров масел в рабочем объеме и др.

Все паромасляные диффузионные насосы требуют предварительного разряжения и начинают работу с давления $p_3 = (1-10)$ Па. Предельное давление насосов зависит от конструкции насосов, от степени охлаждения корпуса насоса, свойств рабочих жидкостей и находится в интервале от 10^{-5} до 10^{-7} Па. При применении азотных ловушек на входе насоса предельное давление можно уменьшить на один – два порядка.

3. Физико-химические методы получения вакуума

3.1 Электрофизические средства откачки

3.1.1 Принцип действия и классификация электрофизических средств откачки

Преимущества физико-химических насосов перед механическими и паромасляными заключаются в возможности устранения загрязнения рабочей камеры парами рабочих жидкостей, которые присутствуют в этих насосах.

Электрофизические насосы всех типов являются накопительными, то есть откачиваемые газы поглощаются в насосе в виде хемосорбционных слоев, химических соединений и «замурованных» атомов [3].

Основной механизм связывания химически активных газов – хемосорбция; инертные газы при нормальной температуре в отличие от химически активных газов внедряются в поверхность твердого тела только в ионизированном состоянии при определенной энергии ионов. Химически активная поверхность, поглощающая газы, может быть организована формированием пористой структуры с высокоразвитой поверхностью, однократным или периодическим нанесением пленки поглощающего металла, непрерывным возобновлением поверхности.

Поглощение газов химически активными металлами может происходить в результате химического взаимодействия и физической сорбции. Физическая сорбция происходит при температуре около температуры кипения сорбата или ниже при данном давлении, хемосорбция – при более высоких температурах.

К газопоглотителям, предназначенным для получения низких давлений, предъявляют следующие требования:

- универсальность хемосорбционных свойств по отношению к максимальному числу газов;
- максимальная поглотительная способность, то есть объем газов, удерживаемых поглотителем;
- малое давление пара газопоглотителя и давление диссоциации продуктов реакции;
- устойчивость материала поглотителя на воздухе после прогрева в вакууме и высокая химическая активность;
- легкое обезгаживание, то есть поглотитель должен содержать небольшое количество газов, легко выделяемых при обезгаживании в вакууме.

В испарительных насосах геттер (газопоглотитель) должен обладать высоким давлением пара при температуре испарения и низким дав-

лением пара при температуре конденсации. Наиболее универсальным геттером является титан.

При взаимодействии нейтральных атомов испаряемого материала и ускоренных ионов откачиваемых газов с поверхностью сорбента различают следующие основные процессы поглощения: сорбция, ионная откачка и «замуровывание» ионов.

Сорбция – поглощение молекул газа в результате образования слабой физической или сильной химической связи и твердых растворов. Физически сорбируются только молекулы инертных газов. При откачке активных газов преобладает механизм образования химических соединений (оксидов, нитридов, гидридов). Эти химические соединения редкоземельных металлов имеют весьма низкие давления паров и диссоциируют лишь при очень высоких температурах.

Ионная откачка – поглощение ионизированных молекул газа в результате внедрения ускоренных электрическим полем ионов в материал геттера с последующей диффузией.

Ионы химически активных газов могут образовывать химические соединения, а ионы инертных газов удерживаются в кристаллической решетке физическими связями. При непрерывной ионной бомбардировке геттера часть ранее захваченных ионов газа в результате катодного распыления может возвращаться в откачиваемой сосуд. При поглощении геттером ионов смеси различных газов возможно замещение одного газа другим. Энергия связи ионов с поверхностью близка к энергии связи молекул при хемосорбции. При постоянной скорости ионов количество поглощенного газа прямо пропорционально силе разрядного тока и времени его прохождения.

«Замуровывание» атомов играет существенную роль при откачке инертных газов, хотя и не влияет на общую быстроту откачки насоса.

При нормальной температуре время сорбции молекул инертного газа на сорбирующих поверхностях слишком мало, чтобы это механизм откачки мог быть заметным. Падающий на поверхность атом находится на поверхности сорбции значительное время, достаточное для «замуровывания» его слоями распыляемого геттера. При увеличении отрицательного потенциала поверхности сорбции и скорости распыления геттера этот эффект становится более значительным и быстрота откачки возрастает.

Таким образом, частица, бомбардирующая катод, может подвергаться упругому или неупругому рассеянию, внедряться в материал катода или сорбироваться на его поверхности. В общем случае взаимодействия, происходящие при этом явлении, определяются видом частицы

(нейтральный атом или заряженный ион) и ее энергией, а также энергетическим состоянием и природой сорбирующей поверхности.

Эффективность работы насосов определяется:

- правильностью выбора формы насоса, обеспечивающего подвод газа к поверхности геттера;

- количеством геттера и степенью его полезного использования.

Поверхность геттера может быть невозобновляемой либо возобновляемой периодически или непрерывно.

По методу нанесения геттера различают испарительные, ионно-сорбционные и магнитные электроразрядные насосы.

3.1.2 Испарительные насосы

В испарительных насосах используется металлическая пленка, которая может быть образована путем прямого или косвенного нагрева рабочего тела. В качестве материала в испарительных насосах чаще всего используется титан. Титан образует прочные нелетучие соединения или твердые растворы почти со всеми газами, имеющимися в вакуумных системах, за исключением инертных газов и углеводородов. Однако различие в механизме поглощения различных газов приводит к тому, что быстрота действия испарительных насосов по разным газам неодинакова.

Как уже было сказано выше, работа испарительных насосов основана на поглощении активных газов поверхностью металлов. Показателем активности газа является теплота адсорбции на данном металле. Наибольшее распространение для хемосорбционной откачки получили следующие металлы: титан (Ti), цирконий (Zr), тантал (Ta), барий (Ba), молибден (Mo), вольфрам (W).

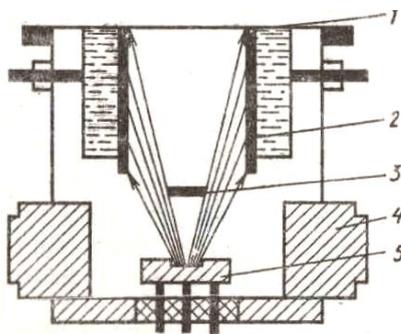


Рис. 12 Схема испарительного насоса:

1—фланец, 2- конденсирующие экраны, 3- защитный экран, 4- корпус, 5- испаритель

Испарение титана происходит в испарителе 5 путем резистивного нагрева. Атомы титана, конденсируясь на экранах 2, образуют пленку титана. Экран охлаждается проточной водой. Пленка титана хемосорбирует газы из откачиваемого объекта.

Охлаждение экранов жидким азотом увеличивает коэффициенты прилипания активных газов, таким образом, увеличивается быстрота действия испарительного насоса.

Возможность непрерывного обновления пленок увеличивает срок службы насоса.

3.1.3 Ионно-сорбционные насосы

Испарительные насосы малоэффективны при откачке инертных газов и для получения низких предельных остаточных давлений ($< 10^{-4}$ Па) необходимо применение дополнительных насосов. В то же время при возбуждении и ионизации откачиваемых газов, поглощение их титановой пленкой идет более интенсивно, причем благодаря ионизации откачиваются и инертные газы. Таким образом, в современных насосах совмещены ионные и хемосорбционные методы откачки.

При ионно-сорбционной откачке используют два способа поглощения газа:

- внедрение ионов в объем твердого тела под действием электрического поля;
- химическое взаимодействие откачиваемых газов с тонкими пленками активных металлов.

Высокоэнергетические ионы, бомбардируя твердое тело, проникают в него на глубину, достаточную для их растворения. Этот способ удаления газа является разновидностью ионной откачки.

За счет внедрения ионов в твердое тело обычно удаляются химически неактивные газы. В качестве пластины для распыления обычно применяют титан. Распыленный титан конденсируется в виде пленок на специальных электродах. На пленках титана хемосорбирует большинство газов из остаточной атмосферы рабочего объема.

Существует два типа ионно-сорбционных насосов: насосы с горячим катодом (термокатодом), в которых титан испаряется за счет бомбардировки, и насосы с холодными электродами, в которых используется явление катодного распыления титана (электроразрядные).

Схема ионно-сорбционного насоса с горячим катодом приведена на рисунке 13.

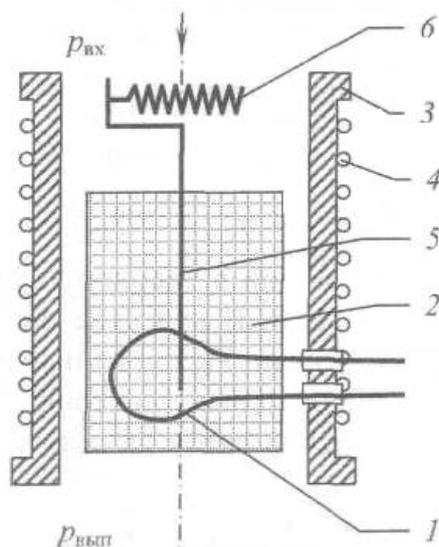


Рис. 13 Схема ионно-сорбционного насоса с горячим катодом:
 1— термокатод; 2 — анод (сетка); 3 — корпус насоса; 4 — охлаждение; 5 — проволока; 6 — катушка с титановой проволокой

Насос состоит из термокатода 1, сетчатого анода 2 и корпуса насоса 3 с охлаждением 4. Титановая проволока 5 подается вдоль системы с катушки 6. Такой насос представляет собой своего рода цилиндрический триод, в котором анод имеет положительный потенциал около 1000 В, катод – потенциал около +100 В, а корпус насоса заземляется.

При прохождении электрического тока, термокатод нагревается и эмитирует электроны. Электроны бомбардируют проволоку из титана, которая испаряется. Частицы титана конденсируются на сетке и на охлаждаемых стенках корпуса насоса. Титан активно поглощает химически активные газы (O_2 , N_2 , CO , CO_2 и др.) в парообразном состоянии и пленками. Электроны из катода ионизируют газы, в том числе и инертные, и образовавшиеся положительные ионы под действием электрического поля движутся к коллектору (корпус насоса), имеющему отрицательный потенциал, и внедряются в его поверхность. Таким образом, газы связываются химически и физически на поверхности и в глубине материала, а также замуровываются непрерывно оседающими парами титана.

Скорость откачки насоса пропорциональна расходу поглотителя в единицу времени. Например, при испарении титана со скоростью 5 мг/с скорости откачки различных газов будут следующими: по водороду – 3 м³/с; азоту – 2 м³/с; двууглекислому газу – 1 м³/с; воздуху – 0,6 м³/с; аргону – 0,005 м³/с при давлении в объеме порядка 10 Па.

Предварительное разрежение для ионно-сорбционных насосов с накаливаемыми катодами (т.е. давление, при котором насос начинает

устойчиво работать) должно быть не больше 10^{-2} Па, а предельное давление достигает 10^{-6} Па.

Недостатком данных насосов являются: малый срок службы термокатода, селективность откачки.

Электроразрядные насосы с холодными электродами представлены конструкцией магниторазрядного насоса.

В отличие от ионно-сорбционных насосов с горячим катодом в магниторазрядных насосах для получения активных пленок титана используется газовый разряд в магнитном поле. Из-за этого в магниторазрядных насосах устранен такой существенный недостаток, присущий насосам с термокатодом, как наличие накаливаемых элементов электродной системы. Кроме того, распыление титана с помощью газового разряда позволяет осуществить авторегулирование скорости распыления и резко увеличить срок службы насоса.

Далее рассмотрим конструкцию магниторазрядного насоса с титановыми катодами (рис. 14).

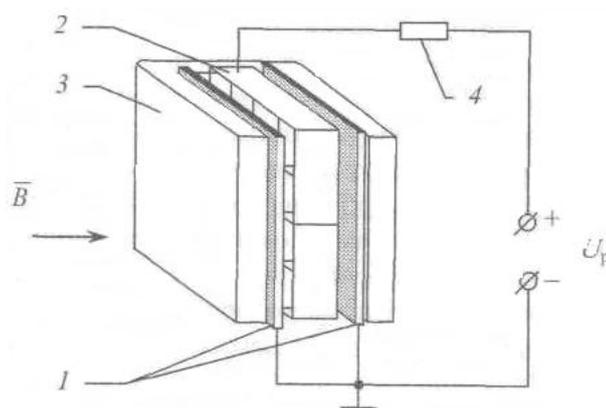


Рис. 14 Принципиальная схема диодного магниторазрядного насоса:
1—катоды; 2 — анод; 3 — постоянный магнит; 4— балластное сопротивление.
Стрелкой показано направление магнитного поля [2]

Плоские титановые катоды 1 и анод 2, состоящие из многих прямоугольных или круглых ячеек, образуют электродный блок, который помещается в магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом 3. Каждое отверстие в аноде вместе с противолежащими участками катодов образует разрядную ячейку насоса.

При приложении разности потенциалов между электродами разрядного блока, находящегося в вакууме, в ячейках насоса возникает электрический разряд. Для возникновения разряда достаточно случайного присутствия в разрядном промежутке нескольких электронов, которые всегда есть в разрядном промежутке. Под действием сильного

магнитного и электрического полей электроны движутся по спирали вокруг оси разрядной ячейки. На своем пути электроны производят ионизацию газа. Образующиеся положительные ионы, бомбардируя катод, распыляют титан из катодных пластин. Поскольку основная часть распыляемых частиц титана представляет собой электрически нейтральные атомы и молекулы, они осаждаются на все поверхности электродов, но в основном на анод. Активные газы, попадая на непрерывно возобновляемую пленку титана, хемосорбируются ею. Катоды также поглощают газы, но из-за постоянного распыления большей части поверхности вклад катодов в процесс откачки активных газов незначителен.

Таким образом, основным механизмом при откачке активных газов является хемосорбция газов непрерывно напыляемой на аноде пленкой титана. Образуются термически устойчивые химические соединения (нитриды, оксиды и карбиды титана). Поглощение этих газов в насосе носит необратимый характер.

Наряду с этим в магниторазрядных насосах имеет место проникновение ионов в материал катода.

Откачка тяжелых инертных газов преимущественно осуществляется за счет внедрения ионов в материал катода. Такой механизм, хотя и не создает достаточно хорошей быстроты действия, является основным при откачке инертных газов магниторазрядным насосом.

Многоатомные газы, пары воды, углеводороды и другие сложные молекулы диссоциируют в разряде на более простые компоненты, которые в свою очередь ионизируются и откачиваются насосом.

Поскольку химическая активность различных газов и эффективность распыления титана их ионами различны, быстрота действия магниторазрядных насосов существенно зависит от рода откачиваемого газа.

Предельное давление магниторазрядных насосов 10^{-8} – 10^{-10} Па. Верхний предел рабочих давлений определяется газовойделением из-за перегрева электродов насоса. При давлении 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.

Большим достоинством ионно-сорбционных насосов является отсутствие рабочей жидкости, что позволяет с помощью них получать безмасляный вакуум в откачиваемом объеме.

3.2 Низкотемпературные средства откачки

3.2.1 Принцип действия и классификация низкотемпературных средств откачки

Действие крионасосов основано на физических явлениях, происходящих при низких температурах:

- конденсации газов на охлаждаемых металлических поверхностях (конденсационные насосы);
- адсорбции газов на твердых охлажденных сорбентах (адсорбционные насосы);
- адсорбции газов на слое предварительно сконденсированного вспомогательного легкоконденсируемого газа (конденсационно-адсорбционные насосы);
- одновременной конденсации откачиваемого газа и вспомогательного легкоконденсируемого газа (криозахватные насосы);
- поглощению газов пленками геттера, осаждаемого на криопанель насоса (криогеттерные насосы).

Принцип действия конденсационных насосов основан на конденсации газов на металлических поверхностях, охлажденных до температуры 20 К и ниже (рис. 15, а).

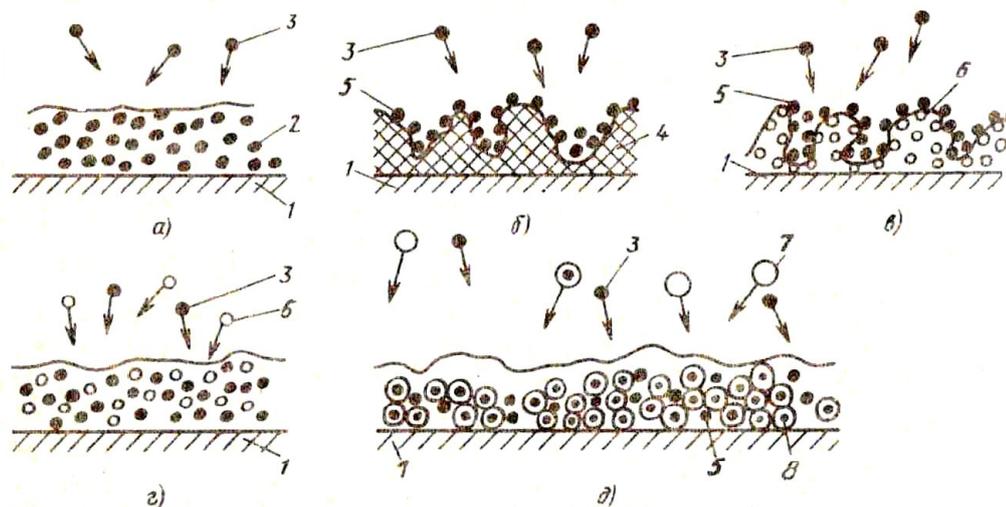


Рис. 15 Схемы работы крионасосов:

1 – криопанель; 2,5,8 – откачные молекулы (2-конденсированные, 5 – адсорбированные, 8-хемосорбированные); 3 – свободные молекулы; 4 – твердый сорбент; 6 – вспомогательный газ; 7 – частицы геттера [3]

Принцип действия адсорбционных насосов основан на сорбции газов твердым сорбентом, нанесенным на криогенную поверхность (рис. 15, б). В адсорбционных насосах важно обеспечить хороший тепловой контакт сорбента с поверхностью, его тепловую защиту и исключить

возможность загрязнения легкоконденсируемыми газами, поскольку это снижает вероятность поглощения водорода, обычно трудно удаляемого из систем. В качестве сорбентов, наносимых на поверхность криопанелей, наиболее часто используют активированный уголь, цеолиты, силикагели, оксидные пленки металлов. Физическая поверхность сорбентов на несколько порядков превышает геометрическую поверхность криопанели.

Принцип действия конденсационно-адсорбционных насосов (рис. 15, в) основан на применении другого вида сорбентов – вспомогательных легкоконденсируемых газов. В качестве вспомогательного газа используют пары воды, диоксид углерода, диоксид серы, оксид азота, пары спирта, ацетона, бензина и др. В этом случае вакуумную камеру с криопанелью, окруженной тепловыми экранами, предварительно откачивают форвакуумным и высоковакуумным насосами до возможно более низкого давления. После отсоединения насоса от камеры криопанель охлаждают и в камеру вводят вспомогательный газ, чтобы на криопанели образовался слой конденсата.

Принцип действия криозахватного насоса заключается в поглощении («криозахвате») неконденсируемых газов легкоконденсированными газами, постоянно подаваемыми на криопанель (рис. 15, з). При откачке водорода необходим постоянный напуск большого количества диоксида углерода (50 молей на 1 моль водорода), что увеличивает тепловую нагрузку на крионасос и, следовательно, на холодильную установку. Явление криозахвата всегда сопровождается процессом конденсации многокомпонентной смеси газов. Особенно возрастает роль криозахвата при откачке водорода в непрогреваемых вакуумных системах, так как основные компоненты остаточной смеси газов этих систем – пары воды и диоксид углерода, которые способствуют криозахвату.

Принцип действия криогеттерного насоса основан на физическом и химическом связывании газов на поверхности и в объеме непрерывно наносимой на криопанель пленки химически активного вещества, в качестве которого чаще всего используют титан (рис. 15, д). По удельной сорбционной емкости криогеттерные насосы примерно в 3 раза превосходят насосы, принцип действия которых основан на сорбции пленками титана, нанесенными на поверхность при нормальной температуре. При низкой температуре миграция осаждаемых частиц геттера заторможена, поэтому образуется пористая пленка с хорошо развитой поверхностью. Для работы насосов этого типа достаточна температура 60-80 К.

В настоящее время наиболее распространены конденсационные и адсорбционные насосы.

3.2.2 Криоконденсационные насосы

Принцип криоконденсационной откачки показан на рисунке 16.

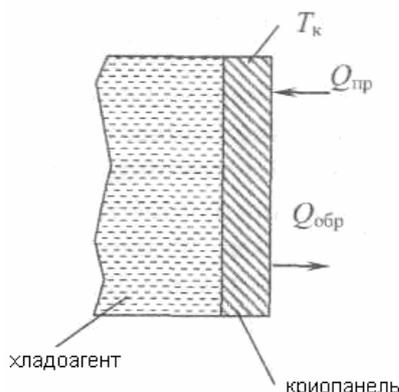


Рис. 16 Схема криоконденсационной откачки

Поверхность твердого тела охлаждается с помощью хладагента до низких температур. Для охлаждения конденсирующей поверхности используются сжиженные газы с низкими температурами кипения T_K : азот ($T_K = 77,3$ К), неон ($T_K = 27,2$ К), водород ($T_K = 20,4$ К), гелий ($T_K = 4,2$ К). Давление насыщенных паров откачиваемых веществ $p_{нас}$ при температуре криопанели должно быть ниже давления, которое необходимо получить в рабочем объеме.

Предельное давление $p_{пр}$, достигаемое при криогенной откачке газа, всегда выше, чем давление насыщения этого газа $p_{нас}$ при температуре хладагента T_K . В этих условиях предельное давление устанавливается при достижении динамического равновесия потоков конденсирующегося $Q_{пр}$ и испаряющегося $Q_{обр}$ газов:

$$p_{пр} = p_{нас} \cdot \sqrt{\frac{T_{Г}}{T_{К}}} \quad (1.13)$$

Таким образом, видно, что предельное давление $p_{пр}$ всегда больше давления насыщенных паров откачиваемого вещества на криопанели $p_{нас}$.

Для получения заданного давления при откачке легких газов требуются более низкие температуры криопанели.

Скорость конденсационной откачки определяется как

$$S_k = \frac{Q_{пр} - Q_{обр}}{\rho_{Г}} \quad (1.14)$$

где $\rho_{Г} = m \cdot \frac{p_{Г}}{k \cdot T_{Г}}$ — плотность газа, [кг/м³].

Для единичной площади криопанели:

$$S_k = \sqrt{\frac{k \cdot T_{\Gamma}}{2 \cdot \pi \cdot m}} \cdot \left(1 - \frac{p_{нас}}{p_{\Gamma}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\Gamma}}{T_{\kappa}}}\right) = \sqrt{\frac{k \cdot T_{\Gamma}}{2 \cdot \pi \cdot m}} \cdot \left(1 - \frac{p_{np}}{p_{\Gamma}}\right) \quad (1.15)$$

При $p_{np} \gg p_{нас}$ получаем максимальную быстроту действия крионасоса:

$$S_{max} = \sqrt{\frac{k \cdot T_{\Gamma}}{2 \cdot \pi \cdot m}} \quad (1.16)$$

Криоконденсационные насосы требуют предварительного разряжения и используются в сочетании с другими типами насосов. На рисунке 17 представлена схема криоконденсационного насоса наливного типа.

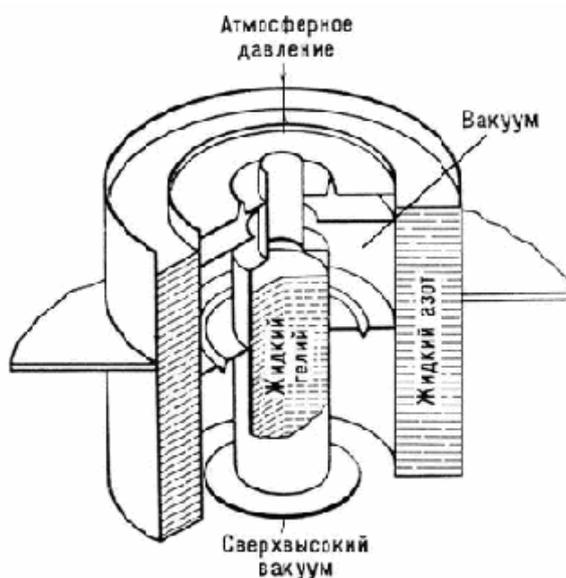


Рис. 17 Конструктивная схема криоконденсационного насоса

Наиболее простой способ охлаждения крионасосов – охлаждение жидким криоагентом, наливаемым в сосуд, наружная поверхность которого служит криопанелью. Эти насосы отличаются простотой конструкции, не требуют подсоединения к электросети и водопроводу, в них нет движущихся деталей.

Недостатки насосов наливного типа:

- необходимость оснащения системой сбора испарившегося рабочего газа;
- значительные потери холода (после окончания работы газ остается в сосуде);

- большой расход криоагента, необходимого во время пуска насоса для охлаждения криопанелей и экранов от нормальной до рабочей температуры;
- необходимость установки только в вертикальном положении.

3.2.3 Криoadсорбционные насосы

Криoadсорбционная откачка осуществляется путем адсорбции газов на охлажденных поверхностях — адсорбентах.

Принцип действия адсорбционных насосов основан на способности предварительно обезгаженных твердых пористых тел поглощать газы и пары благодаря адсорбции. В качестве поглощающих материалов (адсорбентов) могут применяться цеолиты, активированные древесные угли, силикагели.

Однако наибольшее распространение в качестве адсорбента получили цеолиты, представляющие собой алюмосиликаты щелочного или щелочноземельного металла природного или искусственного происхождения. Пористую структуру и очень хорошие адсорбирующие свойства они приобретают после прокаливания. Многочисленные поры образуют большую удельную площадь поверхности.

Для получения более низкого предельного давления адсорбент обычно охлаждается жидким азотом, водородом или гелием.

Недостатком адсорбентов является то, что они плохо поглощают инертные газы.

Криoadсорбционный насос погружного типа представлен на рисунке 18.

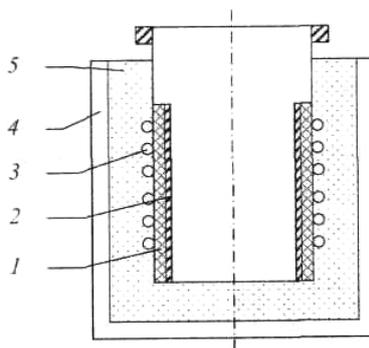


Рис. 18 Конструктивная схема криoadсорбционного насоса:
1—адсорбент; 2—металлический фильтр; 3—нагреватель; 4—сосуд Дьюара;
5—криоагент [1]

Адсорбент 1 помещается внутри пористого металлического фильтра 2. Нагреватель 3 служит для регенерации адсорбента после его на-

сыщения откачиваемым газом. Криоагент 5 помещается в сосуд Дьюара 5. В качестве криоагентов используются сжиженные газы азота, неона, водорода и гелия.

Предельное остаточное давление, создаваемое криоадсорбционным насосом, после предварительного обезгаживания при температуре 420 К составляет порядка 10^{-7} Па. Несмотря на относительную простоту конструкции, криоадсорбционные заливные насосы обладают существенными недостатками, состоящими в необходимости периодической заливки жидкого гелия и азота, трудностях автоматизации и контроле над наличием хладагентов, а также в необходимости транспортировать жидкий гелий и собирать дорогостоящий газ.

Количество адсорбированного газа должно составлять значительную часть газа в объеме вакуумной системы, что обычно наблюдается при температурах адсорбирующих поверхностей ниже температуры кипения газа T_k при атмосферном давлении.

Конечное давление при криоадсорбционной откачке можно определить как

$$p_1 \approx \frac{p_0 \cdot v}{K_T}, \quad (1.17)$$

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;

K_T — коэффициент адсорбируемости газа при T ;

T — конечная температура адсорбента в насосе.

Значения коэффициента адсорбируемости газа для разных адсорбентов представлены в Приложении, табл. 9.

Допустим, что к откачиваемому объему параллельно подключено n адсорбционных насосов, для каждого из которых и для всех вместе выполняются условия, указанные выше. В этом случае насосы работают последовательно: первый насос откачивает от атмосферного давления до давления p_1 , затем отключается от вакуумной системы и подключается второй насос, который откачивает от p_1 до p_2 , и т.д. При многоступенчатой откачке из n насосов достигается конечное давление:

$$p_1 \approx p_0 \cdot \left(\frac{v}{K_T}\right)^n \quad (1.18)$$

Таким образом, криоадсорбционные насосы могут производить откачку с атмосферного давления до сравнительно низких давлений.

Современные модификации крионасосов являются самыми «чистыми» из всего семейства высоковакуумных насосов, применяющихся в настоящий момент. В крионасосах отсутствуют подвижные части, рабочие жидкости или другие рабочие элементы, способные загрязнить откачиваемый объем, что полностью исключает попадание каких-либо загрязнений в рабочую камеру во время откачки.

Для охлаждения специальных встроенных криопанелей до 10 К и 80 К, на которых и происходит осаждение молекул газа, в крионасосе используется система охлаждения замкнутого цикла с гелием в качестве рабочего газа. Молекулы откачиваемого газа, хаотически передвигаясь, контактируют с криопанелями и конденсируются или поглощаются на них.

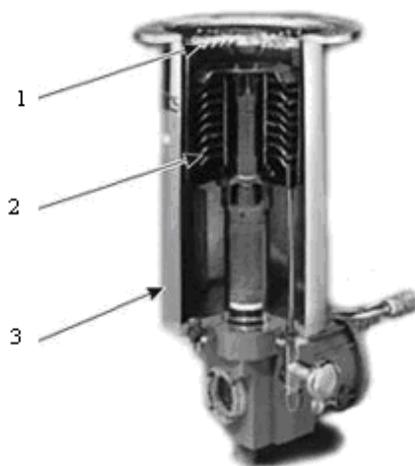


Рис. 19 Схема криогенного насоса [6]:

1—конденсирующая решетка при $T = 80$ К, 2- конденсирующая решетка с древесным углем при $T = 15$ К, 3- корпус из нержавеющей стали

При работе крионасоса гелий, находящийся при комнатной температуре и высоком давлении, нагнетается специальным удаленным компрессором в крионасос на охлажденную головку поршня, которая термически связана с двумя рядами конденсационных решеток. Гелий выбран в качестве рабочего газа, потому что при температурах 10 К и ниже он остается в газообразном состоянии.

Поступающий на головку поршня под давлением гелий затем расширяется и охлаждает решетки. Внешний ряд решеток охлаждается до 80 К и используется для конденсации паров воды, которые обычно являются основной газовой нагрузкой. Внутренний ряд конденсационных решеток охлаждается до температуры 15 К и предназначен для основной части оставшихся газов. Все конденсирующиеся газы переходят в твердое состояние с давлением паров менее 10^{-10} Па. Неконденсируемые

газы, такие как гелий, водород и неон одновременно адсорбируются слоем из капсулированного активированного (древесного) угля, охлажденного до 15 К.

По существу современный крионасос состоит из трех независимых решеток, каждая из которых откачивает определенные типы газов с различными скоростями. При этом скорость откачки напрямую зависит от конструкции решетки.

4 Вакуумные ловушки

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 пробега молекул газа становится больше диаметра входного патрубка насоса, пары жидкости могут двигаться навстречу основному потоку и проникать в откачиваемый объем.

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 объем.

Для защиты откачиваемого объема от паров рабочей жидкости используются специальные устройства, называемые *ловушками* [3]. Ловушки представляют собой устройства, предназначенные для улавливания паров или газов в целях предотвращения или уменьшения их проникновения из одной части вакуумной системы в другую.

Обычно эффективность и качество ловушки оценивают по ее защитной способности, т.е. по обратному потоку и удельной проводимости.

Обратным потоком называют поток паров рабочей жидкости, который поступает из насоса в откачиваемый сосуд.

Удельной проводимостью ловушек $U_{\nu\delta}$ называется отношение проводимости ловушки к площади ее входного отверстия.

Ловушки должны:

- 1) хорошо защищать откачиваемый сосуд от проникновения паров рабочей жидкости;
- 2) препятствовать снижению быстроты действия насоса (не более чем на 30 %);
- 3) иметь конструкцию, обеспечивающую легкий доступ к защитным элементам для их периодической очистки;

4) охлаждаемые ловушки должны обеспечивать малый расход хладагента.

Основные типы вакуумных ловушек представлены в таблице 1.

Таблица 1.1

Типы вакуумных ловушек [2]

Тип ловушек	Наименование	Принцип действия
Механические	Водоохлаждаемая механическая ловушка	Конденсация паров рабочей жидкости на защитных элементах, охлаждаемых водой
Низкотемпературные охлаждаемые	С хладагентом С автономным микроохладителем	Конденсация паров рабочей жидкости на защитных элементах, охлаждаемых жидким азотом
Адсорбционные	Адсорбционные высоковакуумные	Избирательная сорбция углеводов и других высокомолекулярных соединений

Водоохлаждаемые механические ловушки

Во многих случаях при работе с паромасляными диффузионными насосами, использующими рабочие жидкости с достаточно низким давлением насыщенных паров, для уменьшения обратного потока довольствуются тем эффектом, который получается от конденсации паров рабочей жидкости на защитных элементах механических ловушек, охлаждаемых проточной водой.

Простейшей механической ловушкой, служащей для уменьшения проникновения паров рабочей жидкости из паромасляных насосов, является колпачковый маслоотражатель. Он представляет собой колпачок, устанавливаемый над верхним соплом паромасляного насоса и охлаждаемый водой.

Рассмотрим конструкцию водоохлаждаемой механической ловушки (рис. 20).

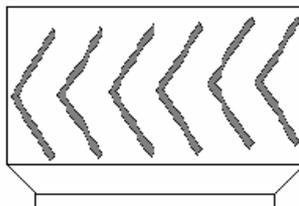


Рис. 20 Водоохлаждаемая ловушка

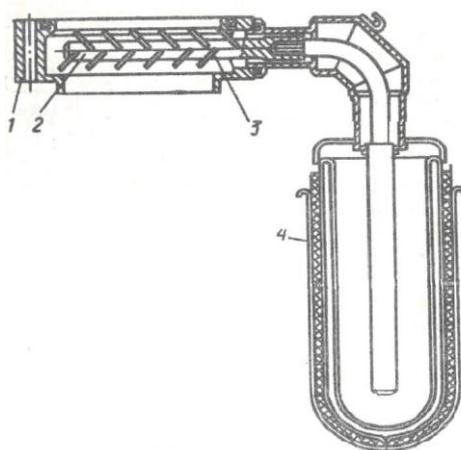
Ловушка проста в изготовлении и имеет сравнительно большую удельную проводимость. Защитные элементы этой ловушки выполнены в виде уголков-шевронов при вершине 90° , размещенных параллельно друг другу.

Низкотемпературные охлаждаемые ловушки

Для наиболее полной защиты откачиваемой системы от паров рабочей жидкости пароструйных насосов служат низкотемпературные ловушки, которые понижают давление пара рабочей жидкости до значения, соответствующего температуре охлажденных элементов ловушки.

Ловушки, охлаждаемые до низких температур, не только более надежно предотвращают проникновение паров рабочей жидкости в откачиваемый сосуд, но и улавливают пары и газы, имеющиеся в откачиваемом сосуде, тем самым снижая давление в нем. Для охлаждения чаще всего применяют жидкий азот.

Рассмотрим самую распространенную конструкцию цельнометаллической жалюзийной ловушки, охлаждаемой жидким азотом (рис. 21).



*Рис. 21 Металлическая жалюзийная азотная ловушка:
1 – корпус, 2 – медный хладопровод, 3 – защитные элементы, 4 – сосуд Дьюара.*

Защитные элементы 3 жалюзийных ловушек малых габаритов охлаждаются с помощью медного хладопровода 2, погружаемого в сосуд Дьюара 4 с жидким азотом.

Адсорбционные ловушки

Несмотря на то, что охлаждаемые ловушки обеспечивают достаточно надежную защиту откачиваемого сосуда от попадания паров рабочей жидкости, их несомненным недостатком является необходимость в постоянной подаче охлаждающего вещества.

Принцип действия сорбционных ловушек основан на сорбции паров масла поверхностью активированного пористого сорбента (активированный уголь, цеолит, оксид алюминия, силикагель, пористые металлы).

Особенность сорбционных ловушек – необходимость активации сорбента перед работой прогревом до $T = 600-700\text{ K}$, а также необходимость периодической регенерации сорбента прогревом после насыщения маслом в процессе работы ловушки.

На рисунке 22 изображена простейшая сорбционная ловушка.

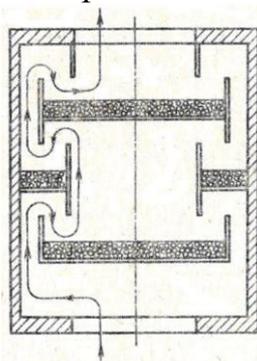


Рис. 22 Сорбционная ловушка

Существует много конструкций сорбционных ловушек с различными вариантами размещения сорбента и расположения нагревателя. Основное требование к конструкции ловушки – исключение возможности перемещения молекул масла без взаимодействия с сорбентом.

Отдельно следует выделить ловушки, используемые в форвакуумной части вакуумной системы. Ловушка эффективно защищает вакуумную систему от обратного потока паров масла, который появляется при работе обычного механического насоса, использующего маслянную смазку в своей рабочей камере. Благодаря этому обеспечивается более низкое давление, более чистая вакуумная система, что позволяет избежать загрязнения высоковакуумного насоса. Принцип действия ловушек основан на сорбции паров масла поверхностью активного пористого сорбента (цеолит, активированный уголь). В конструкции ловушки исключена возможность перемещения молекул масла без взаимодействия с сорбентом.

5. Методы измерения вакуума

5.1 Общие сведения

Как уже было сказано выше, единицей давления является паскаль. Следует заметить, что само понятие «давление газа» для вакуумной техники утратило свой физический смысл, так как почти нет таких технологических процессов в вакууме, которые определялись бы давлением газа, как усилие на единицу поверхности. Так уже при давлении в сосуде 10^{-1} Па сила, с которой молекулы воздействуют на 1 см^2 стенки сосуда, пренебрежимо мала.

Наиболее важной характеристикой газовой среды в вакуумной технике является плотность или молекулярная концентрация газа. Эта величина определяет теплоперенос, сорбционно-десорбционные процессы, воздействие газа на элементы электронных приборов и другие явления. Однако традиционно состояние газа оценивается давлением. Между давлением газа p и молекулярной концентрацией n существует связь:
$$p \cdot V = n \cdot k \cdot T$$

Приборы для измерения давления газа ниже атмосферного называются *вакуумметрами*. В условиях высокого вакуума показания практически всех приборов, применяемых для измерения давлений ниже 10^{-3} Па, пропорциональны не давлению, а концентрации молекул газа.

По принципу действия вакуумметры можно свести в следующие классы:

1) жидкостные вакуумметры, действие которых основано на уравновешивании измеряемого давления гидростатическим давлением столба жидкости (ртути или вакуумного масла). Диапазон измеряемых давлений 10^5 -10 Па;

2) компрессионные вакуумметры, действие которых основано на законе изотермического сжатия газа и измерении его давления по высоте столба жидкости, уравновешивающего это давление. Диапазон измеряемых давлений – 10^3 - 10^{-2} Па;

3) деформационные вакуумметры, в которых измеряемое давление определяется по деформации упругого чувствительного элемента. Диапазон измеряемых давлений – 10^5 - 10^{-2} Па;

4) тепловые вакуумметры, использующие зависимость теплопроводности разреженного газа от давления. Диапазон измеряемых давлений – 10^2 - 10^{-1} Па;

5) ионизационные вакуумметры, в которых используются ионизация молекул газа. Диапазон измеряемых давлений – 10 - 10^{-10} Па.

По методу измерения вакуумметры могут быть разделены на абсолютные и относительные.

Абсолютные вакуумметры измеряют непосредственно давление газа, т.е. силу, действующую на единицу поверхности измерительного элемента. Показания абсолютных приборов не зависят от рода газа. К вакуумметрам прямого действия относятся жидкостные, компрессионные и деформационные. Эти приборы перекрывают диапазон от 10^5 до 10^{-2} Па.

Относительные вакуумметры измеряют не само давление, а используют зависимость параметров некоторых физических процессов, протекающих в вакууме, от давления. Они нуждаются в градуировке. Вакуумметры измеряют общее давление газов, присутствующих в вакуумной системе.

К вакуумметрам косвенного действия относятся тепловые и ионизационные, которые перекрывают диапазон измеряемых давлений от атмосферного до 10^{-10} Па. Большинство вакуумметров состоит из двух элементов: манометрического преобразователя сигнала давления в электрический сигнал и измерительного блока.

В производственных условиях преимущественно используются вакуумметры косвенного действия, которые практически безынерционны, охватывают широкий диапазон давлений и просты в эксплуатации.

5.2 Тепловые вакуумметры

Принцип действия термпарных вакуумметров основан на зависимости теплопроводности разреженных газов от молекулярной концентрации (или давления). Передача теплоты происходит от тонкой металлической нити к баллону, находящемуся при комнатной температуре. Металлическая нить нагревается в вакууме путем пропускания электрического тока.

Из курса молекулярной физики известно, что в плотном газе (высокое давление) теплопроводность не зависит от давления.

При понижении давления уменьшается теплопроводность газа, соответственно, возрастает температура подогревателя и увеличивается термо-э.д.с. При низких давлениях, когда средняя длина свободного пробега молекул больше среднего расстояния между нагретым телом и стенками вакуумметра ($\lambda > d$), теплопроводность газа пропорциональна молекулярной концентрации (давлению).

Преобразователь (рис. 23) представляет собой стеклянный или металлический корпус, в котором на двух вводах смонтирован подогрева-

тель, на двух других вводах крепится термопара, изготовленная из хромель-копеля или хромель-алюмеля. Термопара соединена с подогревателем, который нагревается током, его можно регулировать реостатом и измерять миллиамперметром. Спай термопары, нагреваемый подогревателем, является источником термо-э.д.с., значение которой показывает милливольтметр.

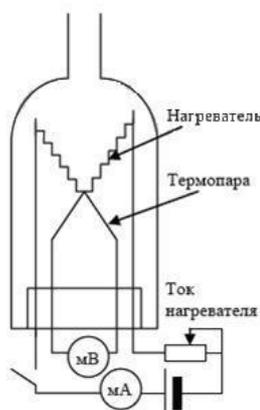


Рис. 23 Схема термопарного вакуумметра [1]

Точность измерения давления термопарным вакуумметром существенно зависит от правильного подбора тока накала подогревателя. Калибровка термопарной лампы (установка тока подогревателя), подбирается таким образом, чтобы стрелка милливольтметра точно совпала с последним делением шкалы. При этих условиях согласно градуировочной кривой термопарного манометрического преобразователя можно по показаниям милливольтметра определить давление в вакуумной системе.

Измерительное уравнение теплового преобразователя можно записать так:

$$p = \frac{I_H^2 \cdot R - (E_H + E_M)}{K_T \cdot (T_H - T_0)}, \quad (1.19)$$

где K_T — коэффициент теплопроводности;

T_H и T_0 — температуры нити и баллона;

I_H — ток, проходящий через нить;

R — сопротивление нити;

E_H, E_M — потери теплоты за счет излучения нити и теплопроводности материала нити.

Из уравнения (1.19) видно, что давление является функцией двух переменных: тока накала нити I_H и температуры нити T_H .

Преимуществом тепловых преобразователей является то, что они измеряют общее давление всех газов и паров, присутствующих в ваку-

умной системе, и обеспечивают непрерывность измерения давления. Диапазон рабочих давлений $5 \cdot 10^3 - 10^{-1}$ Па.

Существенным недостатком тепловых вакуумметров является изменение тока накала нити с течением времени, что требует периодической проверки тока накала. Недостатком также можно считать и их относительную инерционность, т.е. задержку отсчета во времени при быстром изменении давления. Существенное влияние на погрешность измерения тепловыми вакуумметрами оказывает колебание температуры окружающей среды.

5.3 Электронные ионизационные вакуумметры.

Принцип действия электронных преобразователей основан на ионизации газа электронами и измерении ионного тока, по величине которого судят о давлении.

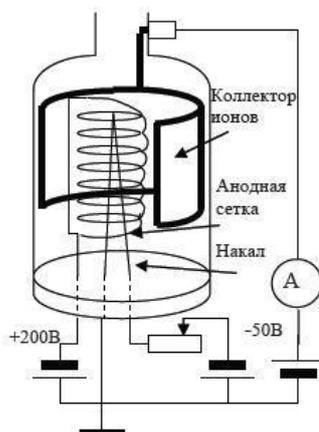


Рис. 24 Схема ионизационного вакуумметра

Ионизация молекул газа производится электронами, эмитируемыми термокатодом и ускоряемыми электрическим полем электрода, на который подается положительный потенциал относительно катода.

В стеклянном баллоне смонтирована трехэлектродная система, состоящая из коллектора ионов, анодной сетки и прямонакального катода. На анодную сетку подается напряжение $+200$ В относительно катода, а на цилиндрический коллектор -50 В. Анодная сетка выполнена из вольфрамовой проволоки в виде спирали. При прогреве преобразователя и его обезгаживании по спирали пропускается ток 3 А. Вольфрамовый катод преобразователя испускает электроны, которые ускоряются электронным полем и движутся к анодной сетке.

Часть электронов пролетает в пространство между анодной сеткой и коллектором. Так как коллектор имеет отрицательный потенциал от-

носителем катода, электроны останавливаются и начинают движение обратно к анодной сетке. В результате у сетки колеблются электроны, причем, прежде чем попасть на нее, электроны совершают в среднем 5 колебаний. При столкновении электронов с молекулами газа происходит ионизация молекул. Образовавшиеся положительные ионы, попадая на коллектор, создают в его цепи электрический ток. Как показывает опыт, при достаточно низких давлениях (ниже 10^{-3} мм.рт.ст.) ионный ток коллектора прямо пропорционален давлению газа, т.е. $p \sim I_{\text{коллектора}}$. Таким образом, для измерения давления достаточно при заданном электронном токе измерить ионный ток и разделить на постоянную преобразователя.

Ионный ток можно охарактеризовать: $I_i = K \cdot I_e \cdot p$, где K – чувствительность манометрического преобразователя.

Отсюда

$$p = \frac{I_i}{I_e \cdot K} \quad (1.20)$$

Чувствительность ионизационных вакуумметров зависит от свойств газа, его температуры, электрического режима и геометрии, то есть

$$K = f(N_i, T, U_{ke}, U_{ki}, \Gamma_{ki}),$$

где N_i – удельная ионизация газа;

T – температура газа;

U_{ke} – потенциал коллектора электронов относительно катода;

U_{ki} – потенциал коллектора ионов относительно катода;

Γ_{ki} – величина, учитывающая влияние геометрии электродов и картину электрического поля между ними.

Удельная ионизация зависит от рода газа. Поэтому вакуумметр должен градуироваться отдельно для каждого газа.

Основные недостатки термоэлектронных ионизационных вакуумметров связаны с применением в манометрических преобразователях горячего катода, являющегося источником электронов. Горячий катод разрушается при резком повышении давления и имеет низкий срок службы при относительно высоких давлениях. Кроме того, наличие горячего катода ограничивает нижний предел измеряемых давлений. Например, ионизационный преобразователь ПМИ-2 измеряет в диапазоне давлений от 1 Па до $5 \cdot 10^{-6}$ Па.

5.4 Магнитные электроразрядные вакуумметры

Одним из путей, позволяющим сдвинуть границу измерения в сторону более низких давлений, может быть увеличение чувствительности манометра. Для этого необходимо, чтобы электроны проходили в пространстве ионизации по возможности большие расстояния до момента их попадания на коллектор электронов. Тогда вероятность ионизации молекул газа этими электронами значительно возрастает, что приведет к увеличению чувствительности манометра. Наиболее простым способом увеличения длины пути электронов в пространстве ионизации является использование магнитного поля, воздействующего на электроны.

Рассмотрим расположение электродов, предложенное Пеннингом. 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.

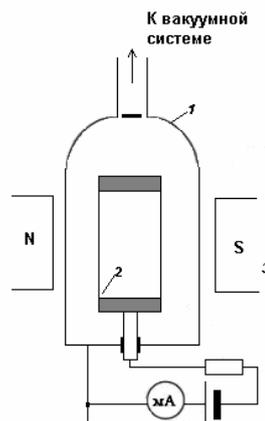


Рис. 25 Схема магнитного электроразрядного вакуумметра:
1 – корпус, 2 – анод, 3 – постоянный магнит.

Манометр имеет катод, которым является корпус 1, и анод в виде металлического кольца 2. Вдоль оси анода создается постоянным магнитом 3 магнитное поле с индукцией 0,05-0,2 Тл. Через балластный резистор на анод подается высокое положительное напряжение порядка 2,5-3 кВ.

Разряд поддерживается между анодом и катодами, соединенными электрически и расположенными по обе стороны от анода. Равномерное магнитное поле, параллельное оси системы, препятствует немедленному уходу на анод электронов. Из-за большой длины пути электрона сильно повышается вероятность ионизации даже при низких давлениях

газа. Образующиеся в результате ионизации молекул электроны движутся, как и первичные электроны, тоже по спиральным траекториям и в конце концов после совершения актов ионизации попадают на анод. Вторичные электроны, выбиваемые из катода положительными ионами, также участвуют в поддержании разряда. Таким образом, благодаря магнитному полю и специальной конструкции электродов тлеющий разряд поддерживается даже тогда, когда средняя длина свободного пути электронов в газе во много раз превышает расстояние между анодом и катодом, что позволяет измерять низкие и сверхнизкие давления газа.

Данный вид вакуумметров позволяет измерять давления до 10^{-10} Па.

Недостатки: данные вакуумметры имеют меньшую точность измерения давления, нуждаются в периодической чистке.

Достоинства – простота конструкции и отсутствие горячего катода. Из-за этого вакуумметры могут быть включены при любом давлении.

6. Вакуумные системы и их элементы

6.1 Типовые вакуумные системы

Различают вакуумные системы для получения низкого, среднего, высокого и сверхвысокого вакуума. В технологических установках при производстве тонких пленок, в основном, требуется вакуум порядка 10^{-3} - 10^{-5} Па. Традиционно такие системы создают с помощью высоковакуумных насосов и насосов предварительного разряжения (форвакуумный насос).

Рассмотрим вакуумную систему (рис. 26), в которой в качестве высоковакуумных насосов используются диффузионные насосы, а в качестве насосов предварительного разрежения – механические масляные насосы.

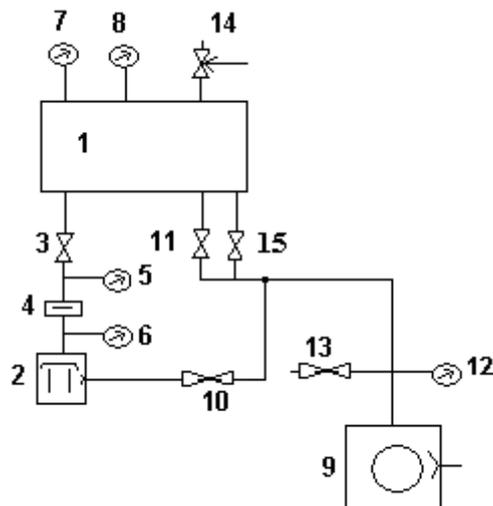


Рис. 26 Типовая вакуумная система:

1–рабочий объем; 2–высоковакуумный насос; 3–затвор; 4–ловушка; 5-8, 12 – вакуумметр; 9 – форвакуумный насос; 10, 11, 13 – клапаны, 14- натекатель, 15 - байпасный клапан

В рабочем объеме 1 высокий вакуум создается насосом 2, который подсоединяется к объему через вентиль 3 (вакуумный затвор) и ловушку 4. Ловушка чаще всего охлаждается азотом и снижает обратный поток паров рабочей жидкости (масла) из высоковакуумного насоса в откачиваемый объем 1. Вакуумметры 5, 6 измеряют давление до и после ловушки. Закрывая затвор 3, можно проверить эффективность работы ловушки по вакуумметру 5 и работоспособность насоса по вакуумметру 6. Вакуумметры 7,8 измеряют давление в вакуумной камере в процессе откачки, а при отключенных насосах позволяют замерить скорость натекания и газовыделения. Насос 9 обеспечивает получение предварительного разряжения и подключается к высоковакуумному насосу 2 через вентиль 10. Работоспособность вращательного насоса 9 может быть проверена при закрытых клапанах 10 и 11 по показаниям термopарного манометра 12. Клапан 13 применяется для напуска атмосферного воздуха в механический насос во время его остановки, чтобы предотвратить попадание рабочей жидкости форвакуумного насоса в высоковакуумный насос. Клапан 14 применяется для напуска атмосферного воздуха в вакуумную камеру. Байпасный (дифференциальный) клапан 15 применяется для уменьшения нагрузки на механический насос во время откачки рабочей камеры с атмосферного давления. Как правило, имеет меньшее проходное сечение, чем клапан 11.

В типовой вакуумной схеме предусмотрены две линии откачки: основная – для получения высокого вакуума в технологическом объеме и

вспомогательная – для предварительной откачки перед включением основной линии.

Вспомогательная линия откачки: рабочий объем 1 – открытый вентиль 15 – форвакуумный насос 9. Через небольшой промежуток времени (достаточно нескольких секунд), необходимо закрыть байпасный клапан 15 и открыть клапан 11. Далее по вспомогательной линии рабочий объем откачивается до давления, достаточного для запуска высоковакуумного насоса. При достижении этого давления необходимо последовательно закрыть вентиль 11, открыть вентиль 10, а затем открыть затвор 3 и продолжить откачивать объем по основной линии откачки.

Основная линия откачки: рабочий объем 1 – открытый затвор 3 – ловушка 4 – высоковакуумный насос 2 – открытый вентиль 10 – форвакуумный насос 9 (вентиль 11–закрыт). После проведения технологического процесса необходимо произвести напуск атмосферы в рабочий объем 1 через натекаТЕЛЬ 14. С этой целью предварительно необходимо отключить вакуумную систему от технологического объема, перекрыв затвор 3.

После загрузки рабочего объема в нем необходимо создать предварительное разрежение, что делается с помощью вспомогательной линии. С этой целью закрывается натекаТЕЛЬ 14 и вентиль 10, а вентиль 11 открываем.

В зависимости от назначения технологической установки к ее вакуумной системе может быть предъявлен ряд требований, выполнение которых обеспечивает возможность выполнения необходимого технологического процесса.

1. Вакуумная система должна обеспечить требуемую быстроту откачки объема. Для этого она должна иметь определенную проводимость, а применяемое средство откачки должно обладать необходимой быстротой действия.

2. Вакуумная система должна обеспечивать получение рабочей среды с заданными параметрами. К таким основным параметрам относятся общее давление и состав остаточных газов, скорость газовыделения внутренних поверхностей вакуумной системы и ее элементов, скорость накопления отдельных газов и паров. Для удовлетворения этого требования вакуумная система должна быть, прежде всего, герметичной. Важным условием выполнения этого требования является подбор материалов, из которых будут изготовлены вакуумная система и ее элементы, а также выбор средств откачки и подготовка вакуумной системы к работе.

3. Вакуумная система, используемая в автоматизированном технологическом оборудовании, должна быть оснащена автоматизированными элементами (клапанами, вакуумметрами и т.д.).

4. Вакуумная система должна быть высоконадежной при эксплуатации и иметь большой межремонтный период.

6.2 Конструкционные элементы вакуумных систем

6.2.1 Разборные вакуумные соединения

Разборные вакуумные соединения относятся к числу наиболее ответственных узлов любой вакуумной системы. Это связано с тем, что потеря вакуумной плотности вакуумной системы чаще всего вызывается разгерметизацией разборного соединения.

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. В качестве уплотнителей могут применяться смазки, резины, фторопласт, металлы. Также для заполнения или изоляции микронеровностей можно использовать пластическую деформацию хотя бы одного из двух соединяемых материалов.

При выборе конструкции разборного соединения для работы в конкретной вакуумной системе руководствуются следующими основными характеристиками [2]:

1) степенью герметичности, то есть потоком воздуха, протекающего в вакуумную систему между поверхностями уплотнителя и элементами соединения, а также путем проникновения газа через материал уплотнителя;

2) газовой выделением с поверхностей уплотнителя и элементов соединения, соприкасающихся с вакуумной полостью системы;

3) термической стойкостью, то есть способностью выдерживать многократные нагревы и охлаждения без нарушения герметичности;

4) легкостью монтажа и демонтажа соединения и степенью сложности его изготовления и проверки герметичности.

В разборных вакуумных соединениях в зависимости от предъявляемых требований, к разрежению в вакуумной системе могут быть использованы как *неметаллические*, так и *металлические* уплотнители.

Разъемные соединения с неметаллическими уплотнителями (резина, фторопласт) просты в изготовлении и надежны в эксплуатации, но имеют ограниченную термическую стойкость и, как правило, повышенное газовыделение уплотнителя, вследствие чего они чаще всего применяются в непрогрываемых вакуумных системах при давлении не менее $5 \cdot 10^{-5}$ Па.

В вакуумной технике в системах с температурой прогрева до 300° С широко применяются резиновые уплотнители. Резиновые уплотнения допускают практически неограниченное число разборок и сборок, просты в изготовлении, редко нуждаются в ремонте. Недостатком резиновых уплотнений, как уже было сказано выше, является повышенное газовыделение и газопроницаемость по сравнению с материалом уплотняемых деталей.

Рассмотрим наиболее распространенные схемы соединений с резиновыми уплотнителями (рис. 27).

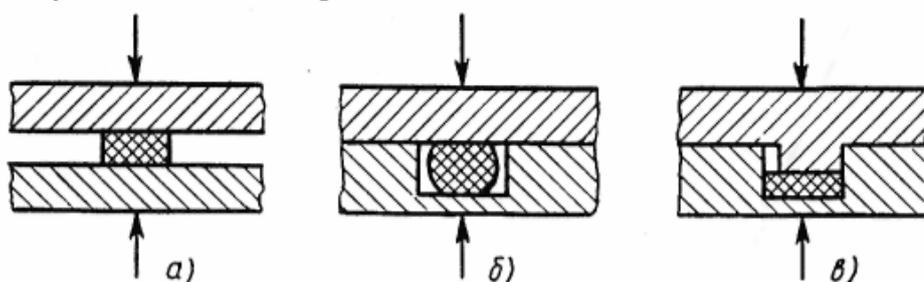


Рис. 27 Конструктивные схемы разборных вакуумных соединений с неметаллическими уплотнителями

Соединение (рис. 27, 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.

Соединение (рис. 27, б) ограничивает максимальное усилие сжатия прокладки и обеспечивает осевую фиксацию за счет соприкосновения соединяемых деталей. Соединения на рис. 27, а, б используются очень

часто в различной вакуумной аппаратуре. Форма уплотнителя для этих соединений может быть как круглая, так и квадратная.

Для создания необходимого усилия герметизации степень деформации прокладки составляет 30%.

Вместо резины в качестве уплотнителя применяют фторопласт, имеющий меньшее газовыделение и газопроницаемость. Недостатком фторопласта является очень низкий предел упругости, поэтому для уплотнения фторопластом необходимо создавать напряженное состояние всестороннего сжатия.

Наилучшим образом этому соответствует конструктивная схема, изображенная на рисунке 27, 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.

При конструировании разборного соединения с неметаллическим уплотнителем необходимо учитывать следующее:

- резиновый уплотнитель не должен воспринимать механические нагрузки и влиять на точность установки деталей;
- для достижения герметичности соединения резиновый уплотнитель в зависимости от твердости материала должен быть деформирован по всей толщине 20-40%;
- резина практически несжимаема, то есть при деформации ее объем остается постоянным. Поэтому сечение канавки под уплотнитель должно быть на 2-5 % больше, чем сечение уплотнителя;
- фланцы разъемного соединения рекомендуется затягивать до соприкосновения металлических поверхностей.

Разъемные соединения с металлическими уплотнителями предназначены для применения в прогреваемых вакуумных системах с давлением менее $5 \cdot 10^{-5}$ Па и должны выдерживать длительные и многократные прогревы до температуры 600-800 К во время обезгаживания вакуумной системы.

В конструкциях прогреваемых разъемных соединений уплотнение достигается путем пластической деформации уплотняющей металлической прокладки. При пластической деформации прокладка заполняет все имеющиеся на поверхностях фланцев микронеровности.

Из-за того, что текучесть металлов по сравнению с резиной невысока, необходимо уплотняющие поверхности фланцев изготавливать с малой шероховатостью. Для уплотнения соединения с металлической прокладкой требуется удельное давление больше, чем при уплотнении с резиновой прокладкой.

Уплотнительные прокладки чаще всего изготавливают из меди и реже из алюминия. Металлические уплотнители практически исключают проникновение газов через материал уплотнителя, а газовыделение их примерно в 10^3 раз меньше, чем у лучших сортов вакуумной резины, но соединение с металлическими прокладками сложнее в изготовлении, допускает ограниченное число прогревов и сборок. Схемы наиболее распространенных металлических уплотнений показаны на рис. 28.

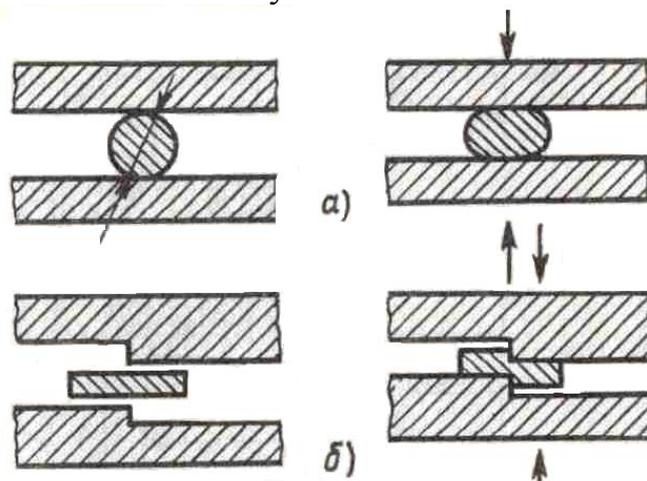


Рис. 28 Схемы уплотнений с металлическими прокладками:
 а – проволочная прокладка; б – плоская прокладка, работающая на срезе.

Соединения с круглым уплотнителем (рис. 28, а) наиболее просты в изготовлении, ремонте и надежно работают с прокладками из меди и золота. Усилие герметизации в таких соединениях с золотой проволокой диаметром 0,8 мм составляет 350 Н/мм.

Усилие герметизации в уплотнении (рис. 28, б) очень чувствительно в соосности режущих кромок. Для прокладок толщиной 4 мм минимальное усилие герметизации для меди 470 Н/мм, а для алюминия – 340 Н/мм.

6.2.2 Вакуумные трубопроводы

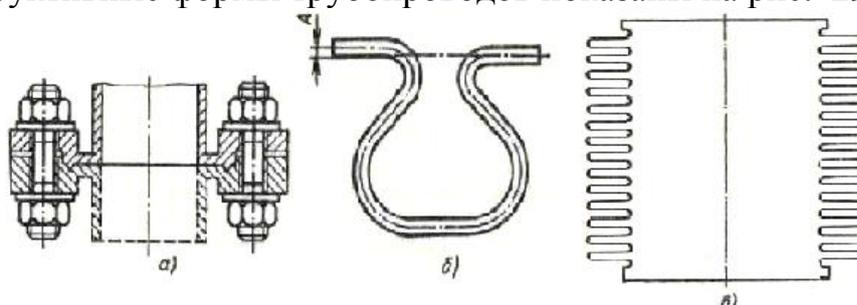
Элементы вакуумных систем размещаются в машинах и установках в соответствии с требованиями технологического процесса, удобства эксплуатации, ремонта и т. д. Связь между ними осуществляется с помощью соединительных элементов – трубопроводов.

Номинальный диаметр отверстия в трубе называется условным проходным диаметром и обозначается D_y .

Трубопроводы могут быть гибкими или жесткими. Гибкие трубопроводы сложнее жестких и применяются для соединения элементов, не

имеющих общей конструкционной базы. Допуск на их установку в этом случае достигает нескольких миллиметров.

Конструктивные формы трубопроводов показаны на рис. 29.



*Рис. 29 Конструктивные формы трубопроводов:
а–жесткий трубопровод; б–изогнутый трубопровод; в–сильфон гидроформованный*

Длина трубопровода обычно назначается из конструктивных соображений, связанных с удобством размещения элементов в каркасе вакуумной установки. Диаметр трубопровода определяют при проекторочном расчете исходя из требований к его проводимости.

Вакуумные трубопроводы должны выдерживать атмосферное давление без разрушения или потери устойчивости.

6.2.3 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]:

- 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 по возможности расположены вне вакуумной камеры.

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 прогеты с целью обезгаживания до 400-500 °С.

Вводы вращения в вакуум отличаются большим разнообразием конструктивных решений, некоторые схемы представлены на рис 30.

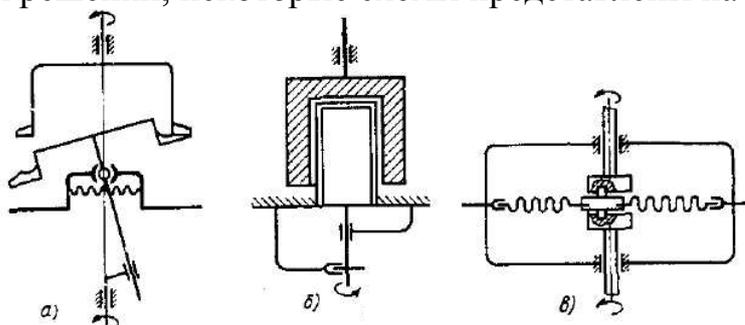


Рис. 30 Схемы вводов вращения в вакуум:

а–с пространственным шарниром и мембраной; б–магнитный; в–со звеном, совершающим плоскопараллельное движение, и мембраной

Конструкции вводов вращения со звеном, совершающим плоскопараллельное движение, показанные на рис. 30, а, б, применяются в прогреваемых высоковакуумных системах для передачи небольших крутящих моментов при малой частоте вращения. На рис. 30, в показана конструкция ввода вращения с притертыми шайбами, используемыми для работы со смазкой во вращательных насосах.

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 силфона 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.

6.2.4 Запорно-регулирующая аппаратура

Запорно-регулирующая аппаратура представляет собой комплекс функциональных средств вакуумных систем, предназначенных для перекрытия газовых потоков, дозирования потоков газа, стабилизации давления газов в вакуумных системах и камерах, аварийной защиты вакуумных систем при разгерметизации и т.д.

Для перекрытия вакуумных потоков используют вакуумные клапаны и затворы, классифицированные по ряду признаков конструктивного и эксплуатационного характера (рис. 31).

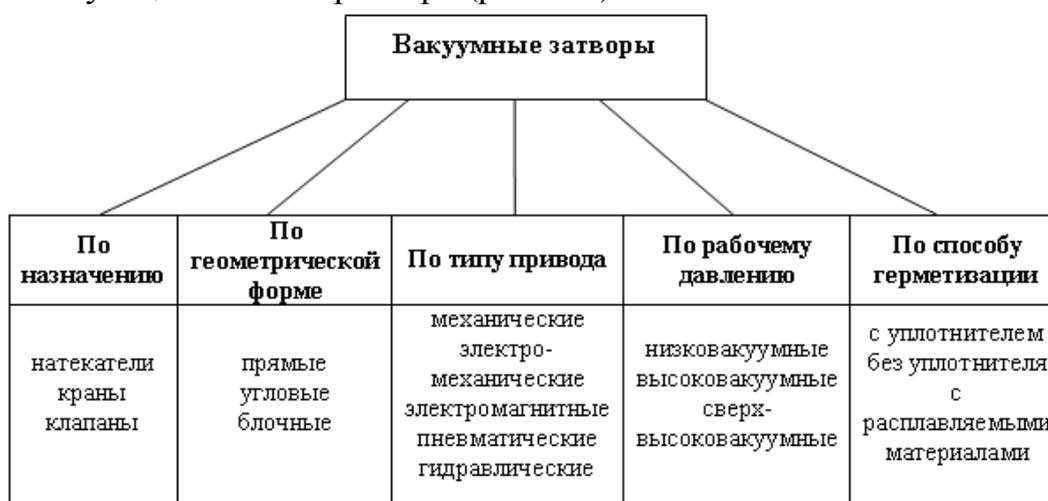


Рис. 31 Классификация вакуумных затворов

В качестве натекаелей могут применяться пористые материалы, некоторые металлы, проницаемые для отдельных газов, например платина для водорода, серебро для кислорода и т. д. Микрометрическое 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.

Вакуумные затворы для трубопроводов больших диаметров для уменьшения габаритов стараются делать плоской формы, используя механизм параллелограмма с малой длиной кривошипа.

Основные эксплуатационные характеристики затворов:

- степень герметичности, определяемая потоком натекания газа через уплотнительную пару и составляющая в зависимости от эксплуатационных требований $10^{-7} - 10^{-11}$ Па·м³/с;

- проводимость в открытом положении, определяемая отношением потока газа, проходящего через полость вакуумного клапана, к разности давлений в его входном и выходном отверстиях;

- быстродействие, определяемое временем герметичного перекрытия;

- ресурс, определяемый числом циклов перекрытия уплотнительной пары с обеспечением заданной степени герметичности.

6.3 Конструкционные вакуумные материалы

Конструкция вакуумных систем во многом определяется свойствами используемых материалов.

В дополнение к обычным требованиям – прочности, технологичности, легкости и тому подобному – вакуумная техника выдвигает к конструкционным материалам ряд специфических требований.

1) *Давление насыщенного пара материала* при рабочей температуре должно быть значительно ниже рабочего давления.

Если давление насыщенного пара материалов при рабочей температуре больше или равно 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. Если латунь разогреть в высоком вакууме до температуры 500° С, то входящий в ее состав цинк испаряется и образуется пористый газопроницаемый материал.

2) *Газовыделение материала* при рабочем давлении и температуре должно быть минимальным.

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 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.

3) *Газопроницаемость материала* в рабочих условиях должна быть минимальной.

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.

4) *Вакуумная герметичность* при малых толщинах.

Вакуумные материалы при малых толщинах должны быть герметичны. Литые материалы чаще всего не удовлетворяют этим требованиям, так как обладают пористой структурой. Наилучшей вакуумной плотностью обладают металлы, подвергнутые вакуумному переплаву.

5) *Коррозионная стойкость*.

Коррозионная стойкость необходима вакуумным материалам в связи с тем, что коррозия увеличивает газовыделение материалов, уменьшает прочность тонкостенных деталей, сопровождается появлением напеканий. Требования к коррозионной стойкости материалов особенно велики при создании сверхвысоковакуумных установок, которые должны регулярно прогреваться при температуре 400–500 °С. 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.

6) *Отсутствие ползучести* вплоть до температур 500–600 °С.

Нагруженные детали прогреваемых вакуумных установок не должны обладать заметной ползучестью вплоть до максимальных рабочих температур 500–600 °С. Ползучесть материалов, из которых изготовлены детали разборных фланцевых соединений, приводит к их разгерметизации после определенного числа циклов прогрева вакуумных установок.

7) *Немагнитность.*

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.

Вакуумные материалы

В вакуумной технике широко применяются такие конструкционные материалы, как чугун, сталь, медь, тугоплавкие металлы, специальные сплавы, стекло, керамика, пластмассы, резина, масла, замазки, клей.

Чугун применяется для изготовления корпусных деталей, работающих в масле в условиях низкого вакуума. Применяются особо плотные, мелкозернистые чугуны.

Конструкционная качественная малоуглеродистая сталь хорошо паяется и сваривается и может применяться для изготовления непрогретаемых деталей вакуумных систем при получении низкого и среднего вакуума. Сталь 45 сваривается значительно хуже и не рекомендуется для сварных вакуумных соединений, но может быть использована для изготовления непрогретаемых резьбовых деталей, валов и других нагруженных деталей. Для деталей прогретаемых 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 в нагартованном состоянии прочнее стали 12Х18Н10Т и могут применяться для изготовления сильно нагруженных деталей – болтов, шпилек и т. д.

Медь широко применяется в вакуумной технике для изготовления прокладок, внутренней арматуры и корпусов отпаянных приборов. Рекомендуется применять марки наиболее чистой меди МБ (бескислородной). Присутствие кислорода в меди особенно вредно для сварки меди и пайки или отжига в водороде. Сварные швы получают пористыми.

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. Алюминий хорошо сваривается гелиево-дуговой сваркой, давая вакуумно-плотные спаи.

Тугоплавкие металлы – вольфрам, молибден, тантал, ниобий применяются для изготовления нагревателей, тепловых экранов, токовводов и т. д. Из титана изготавливаются катоды магниторазрядных 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.

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 $1900^\circ C$. Алундовая керамика хорошо паяется методом металлизации или активных припоев.

Из пластмасс в вакуумной технике делаются многие детали: уплотнители, мембраны, изоляторы, гибкие трубопроводы и т. д.

Широко распространен фторопласт, хорошо обрабатываемый резанием, а при условии медленной деформации и давлением. При температуре выше $200^\circ C$ из фторопласта начинается выделение фтористых соединений. Хрупкость наступает при температурах менее $-70^\circ C$. Газовыделение у фторопласта меньше, чем у резины, он обладает хорошими электроизоляционными свойствами и очень малым коэффициентом трения.

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 $300^\circ C$. 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 очень эластичная с малой газопроницаемостью. Диапазон рабочих температур – от $+90$ до $-10^\circ C$.

Маслостойкая черная резина имеет худшую эластичность и большее газовыделение, но меньшую газопроницаемость.

Для низковакуумных систем, а также в ремонтных работах, часто используются *клеевые соединения*. Эпоксидный клей применяется для

соединения стали, стекла и керамики с рабочей температурой не более 140° С, теряет прочность при длительном воздействии теплой воды. Кремнийорганические клеи могут выдерживать кратковременный нагрев до 300–350° С или длительную работу при 150–180° С.

Рабочие жидкости для вакуумных насосов

В качестве рабочих жидкостей механических вакуумных насосов, как правило, используются минеральные масла марки VM-4, VM-6 и синтетические жидкости.

К рабочим жидкостям струйных насосов предъявляются следующие основные требования:

1) низкое давление насыщенного пара при комнатной температуре;
2) высокое давление пара при рабочей температуре в испарителе, что обеспечивает работу насоса при относительно высоких выпускных давлениях;

3) однородность состава, так как любое изменение состава рабочей жидкости из-за улетучивания отдельных компонентов вызовет изменение характеристик насоса;

4) термическая стабильность при рабочей температуре в испарителе насоса и термоокислительная стойкость;

5) малая химическая активность по отношению к конструкционным материалам и откачиваемым газам;

6) малая удельная теплота парообразования для уменьшения затрат мощности на создание требуемого количества пара в насосе;

7) малая способность к растворению откачиваемых газов и паров, что обеспечивает получение низких предельных остаточных давлений благодаря малому обратному выделению газов и паров струей пара на впуске насоса.

В настоящее время в струйных насосах используются в основном минеральные (нефтяные) масла марок VM-1, VM-5 и синтетическое масло VM-1С.

Часть II Расчет вакуумных систем

7. Проектный расчет

Расчет вакуумных систем осуществляется в 2 этапа:

1. Проектный расчет – выбираются типы насосов и их размеры, коммутирующие элементы и ориентировочные размеры соединительных трубопроводов.

2. Поверочный расчет – уточняются характеристики всех элементов и определенное время достижения рабочего давления.

Проектный расчет выполняют в следующей последовательности [2].

1. *Выбор вакуумной схемы.* Вакуумную схему выбирают по аналогии с уже существующими установками такого же назначения.

2. *Выбор основного насоса.* Исходя из заданного рабочего давления p , в качестве основного насоса выбирается насос, способный откачать рабочий объем до необходимого давления.

а) для нахождения конкретного типоразмера основного насоса необходимо рассчитать суммарный поток газа Q_{Σ} , поступающий в вакуумную систему (методика расчета Q_{Σ} представлена ниже).

б) далее определяется необходимая эффективная быстрота откачки рабочей камеры

$$S_0 = \frac{Q_{\Sigma}}{p_{РАБ}}, \quad (2.1)$$

где Q_{Σ} – суммарный поток газа, поступающий в вакуумную систему, $\text{м}^3\text{Па/с}$;

S_0 – эффективная быстрота откачки рабочей камеры, $\text{м}^3/\text{с}$;

$p_{РАБ}$ – рабочее давление, Па.

в) быстрота действия насоса рассчитывается следующим образом

$$S_H = \nu \cdot S_0, \quad (2.2)$$

где S_H – быстрота действия насоса, $\text{м}^3/\text{с}$;

ν – коэффициент.

Обычно $v = 2$ для струйных, турбонасосов и криогенных насосов.

$v = 4$ для сорбционных насосов.

$v = 1,3-1,4$ для насосов объемного действия.

При выборе насоса должны выполняться два условия:

1) $p_{гр} \leq K_{II} p$. Если это условие не выполняется, то необходимо выбрать насос с меньшим предельным давлением.

2) $S_H \succ S_{НРАСЧ}$. По каталогу [4-11] выбирают вакуумный насос, имеющий номинальную быстроту действия большую или равную расчетному значению.

Таким образом, выбирают насос с характеристиками, соответствующими условиям 1 и 2.

3. *Выбор вспомогательного насоса.* Большинство насосов, такие как пароструйные, турбомолекулярные и др., для запуска и работы требуют создания и поддержания определенного разрежения во всей вакуумной системе, включая насос.

Так как вспомогательный насос обеспечивает предварительное разрежение в камере, чтобы выбрать тип вспомогательного насоса, необходимо по каталогу уточнить значения давления запуска p_z основного насоса и подобрать насос предварительного разрежения, способный обеспечить указанное давление.

Во время работы основного насоса вспомогательный насос производит откачку из высоковакуумного насоса. Давление на входе во вспомогательный насос должно быть меньше выпускного давления на выходе из высоковакуумного насоса. Т.е. вспомогательный насос должен быть способен не только удалять определенное количество газов, поступающих из основного насоса, но и поддерживать определенное выпускное давление на выходе основного насоса.

Рабочее давление вспомогательного насоса при последовательном включении определяется как

$$p_i = \frac{P_{(i-1)}}{\eta}, \quad (2.3)$$

где p_i – рабочее давление вспомогательного насоса, Па;

p_{i-1} – давление предыдущего насоса, Па;

$p_{i-1} = p_{вып}$ – для насосов сжимающих газ;

$p_{i-1} = p_{наиб. раб.}$ – для сорбционных насосов;

η – коэффициент запаса, который может быть равен 2-10, но чаще всего принимают равным 2.

Выбор конкретного вспомогательного насоса производится аналогично выбору основного насоса. По каталогу [4-11] выбирают вакуумный насос, имеющий характеристики, соответствующие условиям $p_{\text{нр}} \leq K_{\text{н}} p$ и $S_{\text{н}} > S_{\text{нрасч}}$.

4. *Принципиальная вакуумная схема.* Затем определяется принципиальная схема вакуумной системы, назначаются ориентировочные размеры трубопроводов и т.д. Например, диаметр трубопровода, соединяющего насосы, обычно выбирают равным диаметру выпускного патрубка основного насоса. Длину трубопровода стремятся сделать как можно меньше, также по возможности стараются избегать изгибов трубопровода.

5. *Время предварительной откачки.* Проверяется возможность использования выбранного вспомогательного насоса для предварительной откачки рабочей камеры (т.е. определяется способность выбранного насоса достичь предварительного разрежения за необходимое время).

Для этого рассчитывается эффективная быстрота откачки конкретно для этого насоса

$$S_0 = \frac{S_{\text{н}}}{1,3-1,4}, \quad \text{м}^3/\text{с} \quad (2.4)$$

где $S_{\text{н}}$ – быстрота действия выбранного насоса (значение из каталога), $\text{м}^3/\text{с}$.

Тогда время предварительной откачки рабочей камеры без учета газовыделения (на этом этапе расчета не учитывается Q_{Σ}) определяется как

$$t = \frac{V}{S_0} \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}, \quad \text{сек} \quad (2.5)$$

где V – объем рабочей камеры, м^3 ;

S_0 – эффективная быстрота откачки камеры, $\text{м}^3/\text{с}$;

p_1 – давление перед началом откачки, Па;

p_2 – давление после откачки, Па.

Если полученное время предварительной откачки меньше заданного, то считается, что насосы выбраны верно. Таким образом, проектный расчет завершен. После проведения проектного расчета конструируют вакуумную систему. В процессе конструирования уточняют все размеры вакуумных трубопроводов, типоразмеры коммутирующих элементов и т.д.

Пример №1. Проектный расчет вакуумной системы.

Исходные данные: суммарный поток газов $8,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3\text{Па/с}$, рабочее давление в камере 10^{-3} Па , время предварительной откачки рабочей камеры вместимостью 25 л до давления 5 Па не более 8 минут.

Проектный расчет.

а) Исходя из заданного рабочего давления 10^{-3} Па , выбираем в качестве основного насоса пароструйный диффузионный насос, для нормальной работы которого необходимо предварительное разрежение порядка 1-10 Па. Для создания указанного предварительного вакуума выбираем пластинчато-роторный насос.

б) Находим конкретный типоразмер диффузионного насоса по значению потока газа. $Q_{\Sigma} = 8,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3\text{Па/с}$. Определим необходимую эффективную быстроту откачки

$$S_0 = \frac{Q_{\Sigma}}{p} = \frac{8,35 \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} = 0,835 \text{ м}^3/\text{с}$$

Далее находим быстроту действия насоса $S_H = v \cdot S_0 = 2 \cdot 0,835 = 1,67 \text{ м}^3/\text{с}$, для пароструйных насосов $v = 2$. Таким образом, коэффициент использования насоса $K_H = S_0/S_H = 0,835/1,67 = 0,5$.

Т.е. при выборе пароструйного диффузионного насоса должны выполняться условия:

- 1) $S_H > 1,67 \text{ м}^3/\text{с}$;
- 2) $p_{np} < K_H \cdot p < 5 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$.

Из каталога выбираем насос DFR-3000 с характеристиками:

Номинальная быстрота действия, $\text{м}^3/\text{с}$	2,7
Наибольшее выпускное давление, Па	60
Предельное давление, Па	$3 \cdot 10^{-5}$

в) Рабочее давление пластинчато-роторного насоса выбираем по максимальному выпускному давлению паромасляного насоса с коэффициентом запаса $\eta = 2$.

Тогда $p = \frac{60}{\eta} = 30 \text{ Па}$, что соответствует эффективной скорости откачки $S_0 = \frac{Q_{\Sigma}}{p} = \frac{8,35 \cdot 10^{-4}}{30} = 2,78 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, так как суммарный поток на данном этапе расчета принимается постоянным.

Далее находим быстроту действия насоса $S_H = v \cdot S_0 = 1,3 \cdot 2,78 \cdot 10^{-5} = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, для объемных насосов $v = 1,3$.

Таким образом, коэффициент использования насоса $K_H = S_0/S_H = 2,78 \cdot 10^{-5} / 3,6 \cdot 10^{-5} = 0,77$

Т.е. при выборе пластинчато-роторного насоса должны выполняться условия:

$$1) S_H > 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$2) p_{np} < K_H \cdot p < 23 \text{ Па.}$$

Из каталога выбираем насос ЗВНР-1Д с характеристиками:

$$\text{Номинальная быстрота действия, м}^3/\text{с} \quad 10^{-3}$$

$$\text{Предельное давление, Па} \quad 7 \cdot 10^{-2}$$

г) Проверим возможность использования насоса ЗВНР-1Д для предварительной откачки камеры размером 25 л за время = 8 минут.

Найдем эффективную быстроту откачки конкретно для этого насоса

$$S_0 = S_H / 1,3 = 10^{-3} / 1,3 = 7,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

Тогда получаем

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{P_1}{P_2} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{7,7 \cdot 10^{-4}} \ln \frac{10^5}{5} = 321 \text{ сек} = 5 \text{ мин}$$

Таким образом, полученное время предварительной откачки меньше заданного.

8. Поверочный расчет

8.1 Расчет суммарного потока газов

После проектирования установки проводится уточненный расчет эффективной быстроты откачки вакуумной камеры. Для этого рассчитывается количество газов, поступающих в вакуумную систему, и строится кривая, характеризующая изменение потока газа во времени.

Суммарный поток газов, поступающих в рабочий объем Q_Σ , определяется следующим образом:

$$Q_\Sigma = Q_{IP} + Q_{НАТ} + Q_{ДИФ} + Q_{ПОВ} = p \cdot S_0, \quad (2.6)$$

где $Q_{НАТ}$ – поток газов, натекающий из атмосферы через течи и соединения, м³Па/с;

$Q_{\text{диф}}$ – поток газов, обусловленный диффузионным газовыделением из глубины конструкционных материалов и обрабатываемых изделий, $\text{м}^3\text{Па}/\text{с}$;

$Q_{\text{пр}}$ – поток, обусловленный проницаемостью стенок вакуумной камеры, $\text{м}^3\text{Па}/\text{с}$;

$Q_{\text{пов}}$ – поток газа с поверхности рабочей камеры и элементов, расположенных в ней, $\text{м}^3\text{Па}/\text{с}$;

p – давление в рабочей камере, Па;

S_0 – эффективная быстрота откачки камеры при давлении p , $\text{м}^3/\text{с}$.

1) Поток $Q_{\text{пр}}$ связан с натеканием газа в вакуумную камеру как по соединениям, так и по сплошному материалу, которые не могут обеспечить абсолютную герметичность. Следовательно, необходимо правильно выбирать толщину стенок, особенно для тонких деталей – сильфонов, мембран и т.д. Чаще всего такой расчет проводят в тех случаях, когда в конструкции вакуумной камеры имеются нагретые элементы, отделяющие вакуумную камеру от атмосферы.

$$Q_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n q_{\text{пр}i} \cdot A_i, \quad (2.7)$$

где $q_{\text{пр}i}$ – удельная проницаемость i -ых материалов (Приложение, табл. 4), $\text{м}^3\text{Па}/\text{м}^2\text{с}$;

A_i – площади поверхностей соответствующих материалов, м^2 .

2) Поток газа с поверхности рабочей камеры и элементов, расположенных в ней

$$Q_{\text{пов}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot A_i, \quad (2.8)$$

где q_i – удельное газовыделение материалов, $\text{м}^3\text{Па}/\text{м}^2\text{с}$;

A_i – площади поверхностей соответствующих материалов, м^2 .

Удельное газовыделение q_i с поверхностей нагретых деталей и элементов рабочей камеры можно считать одинаковым и постоянным во времени (Приложение, табл 5). Так как скорость десорбции газов с поверхности экспоненциально зависит от температуры, то нагретые элементы десорбируют газы практически полностью на начальном этапе нагрева. Затем уровень газовыделения нагретых элементов становится постоянным и соответствует газовыделению оттоженных в вакууме материалов.

Газовыделение с поверхностей холодных элементов (комнатная температура) переменено во времени и определяется как

$$\lg q = A_{ДЕС} - B_{ДЕС} \cdot t, \quad (2.9)$$

где t – длительность откачки, с;

$A_{ДЕС}, B_{ДЕС}$ – постоянные (Приложение, табл. 5).

3) Поток газов, связанный с натеканием в рабочую камеру обычно берется по характеристикам элементов вакуумных систем, а при их отсутствии – равным или несколько большим произведения чувствительности течеискателя на число мест, которые могут стать источником натекания (Приложение, табл. 1).

4) Диффузионное газовыделение связано с выделением газов из конструкционных материалов и зависит от материала и его предварительной обработки.

$$Q_{диф} = \sum_{i=1}^n q_{ди} \cdot A_i, \quad (2.10)$$

где $q_{ди}$ – удельное газовыделение материалов, $\text{м}^3 \text{Па} / \text{м}^2 \text{с}$;

A_i – площади поверхностей элементов, м^2 .

$$q_{д} = \frac{c_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{D}{t}},$$

где c_0 – начальная концентрация газа в твердом теле, $\text{м}^3 \text{Па} / \text{м}^3$;

D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2 / \text{с}$;

t – время откачки, с.

Значения c_0 и D даны в Приложении (табл. 6 и 7).

5) Рассчитывается общий поток газов Q_{Σ} как сумма всех потоков газов, поступающих в рабочую камеру. Результат обычно представляется в виде таблицы и графика зависимости $Q_{\Sigma}(t)$.

Пример №2. Рассчитать поток газов, проникающих из атмосферного воздуха в вакуумную камеру через ввод для воды, изготовленный из фторопласта – 4 и имеющий площадь 2 см^2 и толщину 5 см при температуре $T = 293 \text{ К}$.

1. Проницаемость фторопласта-4 для азота при 293 К в соответствии с Приложением (табл. 4) при давлении 1 Па и толщине пластины 1 м равна $q = 8,27 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \text{Па} / (\text{м}^2 \text{с})$. Учитывая, что парциальное давление азота в атмосфере равно $7,9 \cdot 10^4 \text{ Па}$ (Приложение, табл. 2) и толщина ввода воды Z равна 5 см, получим

$$q_1 = \frac{q \cdot p^{1/j}}{Z} = \frac{8,27 \cdot 10^{-13} \cdot (7,9 \cdot 10^4)^{1/1}}{5 \cdot 10^{-2}} = 1,307 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{м}^2 \text{с}}$$

$j = 1$ для неметаллов, $j = 2$ для металлов.

Поток азота будет равен $Q_{N_2} = q_1 \cdot A = 1,307 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 2,61 \cdot 10^{-10} \frac{m^3 Pa}{c}$

2. Проницаемость фторопласта-4 для кислорода при 293 К в соответствии с Приложением (табл. 4) при давлении 1 Па и толщине пластины 1 м равна $q = 1,88 \cdot 10^{-12} \frac{m^3 Pa}{(m^2 c)}$. Учитывая, что парциальное давление кислорода в атмосфере равно $2,12 \cdot 10^4$ Па (Приложение, табл. 2) и толщина ввода воды Z равна 5 см, получим

$$q_1 = \frac{q \cdot p^{1/j}}{Z} = \frac{1,88 \cdot 10^{-12} \cdot (2,12 \cdot 10^4)^{1/1}}{5 \cdot 10^{-2}} = 7,97 \cdot 10^{-7} \frac{m^3 Pa}{m^2 c}$$

$j = 1$ для неметаллов, $j = 2$ для металлов.

Поток кислорода будет равен

$$Q_{O_2} = q_1 \cdot A = 7,97 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 1,59 \cdot 10^{-10} \frac{m^3 Pa}{c}$$

Проницаемость ввода воды по водороду, гелию и другим газам не рассматривается ввиду их незначительного содержания в воздухе.

3. Общий поток газа через ввод для воды

$$Q_{\Sigma} = 2,61 \cdot 10^{-10} + 1,59 \cdot 10^{-10} = 4,2 \cdot 10^{-10} \frac{m^3 Pa}{c}$$

Пример №3. Рассчитать поток газов с поверхности элементов, расположенных в рабочей камере печи отжига.

Нагретыми элементами являются нагреватель с площадью поверхности $0,44 \text{ м}^2$, внутренний защитный экран, изготовленный из молибдена, с площадью поверхности $1,5 \text{ м}^2$, внешний защитный экран, изготовленный из никеля с площадью поверхности $2,07 \text{ м}^2$.

Так как скорость удельного газовыделения с поверхностей нагретых элементов после температурного вакуумного отжига для всех материалов примерно одинакова, следовательно, можно считать, что значение скорости удельного газовыделения q равна $5 \cdot 10^{-9} \frac{m^3 Pa}{(m^2 c)}$ лежит в интервале скоростей удельного газовыделения для нержавеющей стали после отжига в вакууме при 673 К (Приложение, табл. 5).

$$Q_{\text{пов}} = q_i \cdot A_i = q_i \cdot (A_{Mo} + A_{Ni} + A_{НАГР}) = 5 \cdot 10^{-9} \cdot (0,44 + 1,5 + 2,07) = 2 \cdot 10^{-8} \frac{m^3 Pa}{c}$$

Пример №4. Определить общий поток газа, поступающий в вакуумную систему при комнатной температуре с поверхностей вакуумной камеры, изготовленной из нержавеющей стали. Площадь поверхности стенок – 5350 см^2 , время откачки – 2 ч. Число возможных мест натекания газа равно 12, проверка осуществлялась с чувствительностью $5 \cdot 10^{-13}$

м³Па/с. Принять, что в системе отсутствуют материалы, способные пропускать газы при комнатной температуре.

Суммарный поток газа, поступающий в вакуумную камеру

$$Q_{\Sigma} = Q_{ПР} + Q_{НАТ} + Q_{ДИФ} + Q_{ПОВ}$$

1. Поток газа, обусловленный проницаемостью стенок вакуумной камеры $Q_{ПР}$ равен 0, так как по условию задачи в системе отсутствуют материалы, способные пропускать газы при комнатной температуре.

2. Поток газов, обусловленный диффузионным газовыделением из глубины конструкционных материалов и обрабатываемых изделий $Q_{ДИФ}$ равен 0, так как при комнатной температуре отсутствует диффузия из глубины материала.

3. Рассчитаем поток газа через неплотности в местах соединения узлов рабочей камеры. Так как чувствительность течеискателя равна $5 \cdot 10^{-13}$ м³Па/с, а число возможных мест натекания газа равно 12, то

$$Q_{НАТ} = 5 \cdot 10^{-13} \cdot 12 = 6 \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$$

4. Расчет $Q_{ПОВ}$ производится по формуле

$$Q_{ПОВ} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot A_i$$

где A – площадь поверхности материалов.

Так как газовыделение ненагретых деталей переменное во времени, то q_d определяется как

$$\lg q = A_{ДЕС} - B_{ДЕС} \cdot t$$

По данным из Приложения (табл. 5), для нержавеющей стали $A_{ДЕС} = -3,467$, $B_{ДЕС} = 4,25 \cdot 10^{-5}$. Результат расчета заносится в таблицу 2.1

Таблица 2.1

Результаты решения примера №4

t , сек	q , м ³ Па/(м ² с)	$Q_{ПОВ}$, м ³ Па/с	$Q_{НАТ}$, м ³ Па/с	Q_{Σ} , м ³ Па/с
1000	$3,094 \cdot 10^{-4}$	$1,655 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-12}$	$1,655 \cdot 10^{-4}$
2000	$2,805 \cdot 10^{-4}$	$1,501 \cdot 10^{-4}$		$1,501 \cdot 10^{-4}$
3000	$2,544 \cdot 10^{-4}$	$1,361 \cdot 10^{-4}$		$1,361 \cdot 10^{-4}$
4000	$2,307 \cdot 10^{-4}$	$1,234 \cdot 10^{-4}$		$1,234 \cdot 10^{-4}$
5000	$2,092 \cdot 10^{-4}$	$1,119 \cdot 10^{-4}$		$1,119 \cdot 10^{-4}$
6000	$1,897 \cdot 10^{-4}$	$1,015 \cdot 10^{-4}$		$1,015 \cdot 10^{-4}$
7200	$1,687 \cdot 10^{-4}$	$9,023 \cdot 10^{-5}$		$9,023 \cdot 10^{-5}$

Пример 5. Рассчитать поток азота, выделяющегося из деталей с площадью поверхности 200 см², изготовленных из железа во время

обезгаживания их в электрической вакуумной печи при температуре 1273 К в течение 30 минут.

Диффузионное газовыделение с поверхности, площадью $0,02 \text{ м}^2$

$$Q_{\text{диф}} = 0,02 \cdot q_{\text{д}},$$

Рассчитаем удельное газовыделение. По данным Приложения (табл. 6, 7), концентрация азота в железе $c_0 = 25 \cdot 10^3 \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{м}^3$, коэффициент диффузии азота в железе при $T=1273 \text{ К}$ равен $1,35 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2 / \text{с}$.

$$q_{\text{д}} = \frac{c_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{D}{t}} = \frac{25 \cdot 10^3}{2} \cdot \sqrt{\frac{1,35 \cdot 10^{-11}}{t}},$$

Результат расчета заносится в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

Результаты решения примера №5

$t, \text{ с}$	$q_{\text{д}}, \text{ м}^3 \text{ Па} / (\text{м}^2 \text{ с})$	$Q_{\text{диф}}, \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{с}$
200	$3,248 \cdot 10^{-3}$	$6,495 \cdot 10^{-5}$
400	$2,296 \cdot 10^{-3}$	$4,593 \cdot 10^{-5}$
600	$1,875 \cdot 10^{-3}$	$3,75 \cdot 10^{-5}$
800	$1,624 \cdot 10^{-3}$	$3,248 \cdot 10^{-5}$
1000	$1,452 \cdot 10^{-3}$	$2,905 \cdot 10^{-5}$
1200	$1,326 \cdot 10^{-3}$	$2,652 \cdot 10^{-5}$
1400	$1,227 \cdot 10^{-3}$	$2,455 \cdot 10^{-5}$
1600	$1,148 \cdot 10^{-3}$	$2,296 \cdot 10^{-5}$
1800	$1,083 \cdot 10^{-3}$	$2,165 \cdot 10^{-5}$

8.2 Расчет проводимости высоковакуумной системы.

Рассмотрим расчет проводимости при различных режимах течения газа.

а) Определим режим течения газа при заданном давлении.

Для определения режимов течения газа используются критерии Кнудсена.

Молекулярный режим течения газа имеет место, когда $K_n = \lambda/d \geq 1/3$.

Учитывая, что $\lambda = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot P \cdot d_M^2}$, получим

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \bar{p} \cdot d_M^2 \cdot d} \geq \frac{1}{3},$$

отсюда

$$\bar{p} \cdot d \leq \frac{3 \cdot k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_M^2},$$

где d – диаметр трубопровода, м;

\bar{p} – среднее давление газа в трубопроводе, Па;

d_M – диаметр молекулы газа, м;

k – постоянная Больцмана;

T – температура газа в трубопроводе, К;

Для воздуха при $T=293$ К ($d_M=0,375 \cdot 10^{-9}$ м) получим

$$\bar{p} \cdot d \leq 0,02 \text{ Па} \cdot \text{м} \quad (2.11)$$

Для вязкостного режима должно выполняться условие $K_n = \lambda/d \leq 5 \cdot 10^{-3}$, что соответствует

$$\bar{p} \cdot d \geq 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м} \quad (2.12)$$

Молекулярно-вязкостный режим будет иметь место при условии

$$0,02 \leq \bar{p} \cdot d \leq 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м} \quad (2.13)$$

б) Проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения газа.

Молекулярный режим течения газа имеет место в условиях высокого вакуума, когда длина свободного пробега λ много больше диаметра трубопровода d ($\lambda \gg d$). В этом случае молекулы практически не взаимодействуют друг с другом, а сталкиваются только со стенками трубопровода.

При истечении газа из сосуда, размеры которого соизмеримы с размерами отверстия ($d_{отв}/d_C > 0,1$), проводимость отверстия возрастает. Формулы для расчета приведены в таблице 2.4.

Проводимость коротких трубопроводов ($l < 15d$) проще всего рассчитать по формуле

$$\frac{1}{U_{КОР}} = \frac{1}{U_{ТР-М}} + \frac{1}{U_{ОТВ-М}}, \quad (2.14)$$

где $U_{КОР}$ – проводимость короткого трубопровода при молекулярном режиме течения газа, м³/с.;

$U_{ТР-М}$ – проводимость длинного трубопровода при молекулярном режиме течения газа, м³/с. (ф. 2.23 табл. 2.4);

U_{OTB-M} – проводимость отверстия при молекулярном режиме течения газа, м³/с. (ф. 2.19 табл. 2.4).

Проводимости местных сопротивлений (клапаны, краны, расширения, сужения и т.д.) при молекулярном режиме обычно учитывают путем некоторого увеличения фактической длины трубопроводов (ф. 2.25–2.27 табл. 2.4).

Проводимость длинных цилиндрических трубопроводов рассчитывается по формулам, представленным в таблице 2.4.

в) Проводимость трубопровода при вязкостном режиме течения.

Вязкостный режим течения наблюдается в низком вакууме, когда длина свободного пробега молекул газа λ много меньше диаметра трубопровода d ($\lambda \ll d$). В этих условиях число столкновений между молекулами намного превышает число ударов о стенки. Газ в целом движется с различной скоростью по поперечному сечению трубопровода.

Проводимость коротких трубопроводов при вязкостном режиме определяется как

$$U_{КОР} = \frac{U_B}{K_1}, \quad (2.15)$$

где $U_{КОР}$ – проводимость короткого трубопровода при вязкостном режиме течения газа, м³/с;

U_B – проводимость длинного трубопровода при вязкостном режиме течения газа, м³/с (ф. 2.22 табл. 2.4);

K_1 – коэффициент (Таблица 2.3).

Таблица 2.3

Значения коэффициента K_1 в формуле 2.15.

$\frac{10^3 \cdot l}{d \cdot R_e}$	2	4	8	12	16	20	24	28
K_1	1,9	1,7	1,46	1,32	1,22	1,14	1,1	1,09

где R_e – число Рейнольдса; l – длина трубопровода, м; d – диаметр трубопровода, м

$$R_e = \frac{4 \cdot m \cdot Q}{\pi \cdot k \cdot T \cdot \eta \cdot d}$$

где m – масса молекулы, кг; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – термодинамическая температура, К; η – динамическая вязкость газа, Па·с; Q – поток газа, протекающий через трубопровод, м³Па/с. (Рассчитывается как $Q = U_B(p_1 - p_2)$, U_B – проводимость длинного трубопровода при вязкостном режиме течения газа, м³/с (ф. 2.22 табл. 2.4)).

При вязкостном режиме течения газа расчеты *проводимости местного сопротивления* достаточно сложны и для их упрощения обычно учитывают уменьшение проводимости из-за влияния местных сопро-

тивлений путем удлинения трубопроводов (ф.2.24 табл. 2.4). Основные формулы для расчета проводимостей при молекулярном и вязкостном режиме приведены в таблице 2.4.

г) Проводимость при молекулярно-вязкостном режиме.

Полный переход от вязкостного режима течения газа к молекулярному занимает интервал давлений примерно 2 порядка, причем в этой области соотношения для подсчета проводимостей как при вязкостном, так и при молекулярных режимах не применимы.

Обычно проводимость элементов при молекулярно-вязкостном режиме считают равной сумме проводимостей при вязкостном и молекулярных режимах с учетом поправочного коэффициента K .

Так *проводимость отверстия* при молекулярно-вязкостном режиме

$$U_{M-B} = U_B + K \cdot U_M, \quad (2.16)$$

где U_B – проводимость отверстия при вязкостном режиме, м³/с (ф. 2.18 табл. 2.4);

U_M – проводимость отверстия при молекулярном режиме, м³/с (ф. 2.19 табл. 2.4);

K – коэффициент, равный 0,8-1.

Также рассчитывается *проводимость цилиндрического трубопровода*, причем U_B и U_M определяются по формулам 2.22 и 2.23 соответственно.

Проводимости коротких трубопроводов ($l < 15d$) рассчитываются также по ф. 2.16, но U_B и U_M определяются по формулам 2.15 и 2.19 соответственно.

Проводимости местных сопротивлений при молекулярно-вязкостном режиме

$$U_{M-B} = U_M + \frac{U_B - U_M}{P_B - P_M} \cdot (p_i - P_M), \quad (2.17)$$

где U_B – проводимость местного сопротивления при вязкостном режиме, м³/с;

U_M – проводимость местного сопротивления при молекулярном режиме, м³/с;

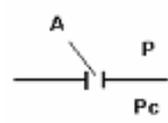
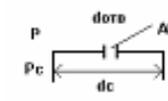
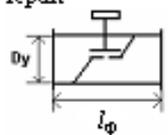
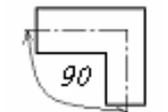
P_B – верхняя граница молекулярно-вязкостного режима, Па;

P_M – нижняя граница молекулярно-вязкостного режима, Па;

p_i – давление, при котором определяется проводимость, Па.

Таблица 2.4

Формулы для расчета проводимостей [2]

Наименование и схема	Режим течения газа	
	Вязкостный	Молекулярный
Отверстие 	$U_g = \frac{A_0}{1 - P/P_c} \times \sqrt{\frac{R_0 T}{M} \cdot \frac{2\chi}{\chi - 1} \left(\frac{P}{P_c}\right)^{\frac{2}{\chi}} \left[1 - \left(\frac{P}{P_c}\right)^{\frac{\chi - 1}{\chi}}\right]}$ (2.18)	$U_M = 36,4 \cdot A_0 \sqrt{T/M}$ (2.19)
Сосуд ограниченного размера 	Значения проводимости, полученные по формуле (2.18) умножить на поправочный коэффициент K_3 $K_3 = \frac{1}{1 - A_0/A}$ (2.20)	Значения проводимости, полученные по формуле (2.19) умножить на K_4 $K_4 = \frac{K_5}{1 - A_0/A}$ (2.21) K_5 в таблице 2.5.
Длинный трубопровод  Кран  Колено 	Для воздуха при $T = 293$ К $U_g = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2}$ (2.22) $l_{расч} = (2-3) l_\phi$ (2.24)	$U_M = 38,1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \sqrt{T/M}$ (2.23) $l_{расч} = \frac{1,3 \cdot d_{кр}}{K_8}$ (2.25) $K_8 = 0,06-0,15$ для $ДУ < 0,1$ м $K_8 = 0,6-0,7$ для $ДУ > 0,4$ м $l_{расч} = l_\phi + 1,33d$ (2.26)
Изгиб трубопровода 		$l_{расч} = l_\phi + 2,6 \cdot d \cdot \frac{\phi}{180^\circ}$ (2.27)

где U_g – проводимость трубопровода при вязкостном режиме течения газа, $м^3/с$; U_M – проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения газа, $м^3/с$; A – площадь поперечного сечения трубопровода, $м^2$; A_0 – площадь поперечного сечения отверстия, $м^2$; p – противодействие вытекающему из сосуда газу, Па; p_c – давление газа в сосуде, Па; R_0 – универсальная газовая постоянная, $8,314$ Дж/(К·моль); T – абсолютная температура, К; M – молекулярная масса, г/моль; χ – показатель адиабаты; $d_{отв}$ – диаметр отверстия, м; d_c – диаметр сосуда, м; d – внутренний диаметр трубопровода, м; $ДУ$ – условный проход крана, $ДУ = d_{кр}$, м; l – длина трубопровода, м; $l_{расч}$ – расчетная длина, м; l_ϕ – фактическая длина, м; p_1 – давление на входе в трубопровод, м; p_2 – давление на выходе трубопровода, м; λ_1 – длина свободного пробега молекулы, м; ϕ – угол изгиба трубопровода, град.

Таблица 2.5

Значения коэффициента K_5 в формуле 2.21.

$\frac{d_{отв}}{d_c}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
K_5	1,002	1,007	1,017	1,03	1,049	1,074	1,107	1,152	1,216	1,333
где $d_{отв}$ – диаметр отверстия, м; d_c – диаметр сосуда, из которого вытекает газ, м.										

Пример №6. Рассчитать проводимость по воздуху при комнатной температуре электромагнитного клапана с размером проходного сечения ДУ 30 мм и длиной 150 мм при среднем давлении 50 Па.

1. Определим режим течения газа при заданном среднем давлении 50 Па.

Воспользуемся критерием Кнудсена:

$$\bar{p}d \leq 0,02 \text{ – молекулярный режим;}$$

$$\bar{p}d \geq 1,33 \text{ – вязкостный режим.}$$

Определяем граничное давление для молекулярного режима:

$$\bar{p} \leq \frac{0,02}{0,03} \leq 0,67 \text{ Па}$$

Граничное давление для вязкостного режима:

$$\bar{p} \geq \frac{1,33}{0,03} \geq 44,33 \text{ Па}$$

Таким образом, при давлении 50 Па будет наблюдаться вязкостный режим течения газа.

Проводимость клапана при вязкостном режиме рассчитывается по формуле 2.22 с учетом формулы 2.23. Причем, $l_{расч} = 2 \cdot l_{\phi} = 2 \cdot 0,15 = 0,3$ м.

Тогда

$$U_B = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{0,03^4}{0,3} \cdot 50 = 0,184 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Пример №7. Рассчитать проводимость трубопровода по воздуху при комнатной температуре (298 К) при молекулярном режиме течения газа. Начальное давление равно 10^{-1} Па, конечное – 10^{-4} Па, диаметр равен 0,1 м, длина трубопровода – 0,2 м.

Определяем среднее давление и проверяем выполнение условия для молекулярного режима:

$$\bar{p} = \frac{10^{-1} + 10^{-4}}{2} = 0,05 \text{ Па} \leq 0,02,$$

т.е. имеет место молекулярный режим.

$$U_m = 38,1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} = 38,1 \cdot \frac{0,1^3}{0,2} \cdot \sqrt{\frac{298}{29}} = 0,611 \text{ м}^3/\text{с}$$

Пример №8. Определить при молекулярном режиме течения газа проводимость магистрали, соединяющей вакуумную камеру с высоковакуумным насосом. Откачиваемый газ – воздух, температура газа – 298 К.

Проводимость затвора, установленного на входном отверстии высоковакуумного насоса, равна $4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Магистраль состоит из отверстия на выходе из камеры диаметром 250 мм, патрубка с диаметром 250 мм и длиной 200 мм и затвора.

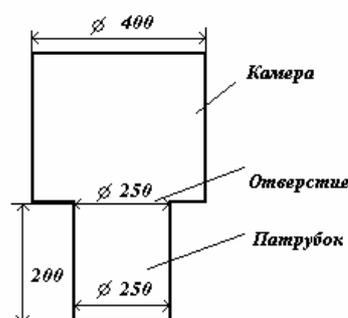


Рис. 32 К примеру расчета проводимости магистрали

Расчет проводимости магистрали ведем, разбивая ее на отдельные участки и определяя проводимость каждого в отдельности.

1. Проводимость отверстия.

Определим проводимость отверстия по формуле 2.19 с учетом формулы 2.21.

Площадь отверстия A_0 :

$$A_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} = 4,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

Площадь выходного сечения камеры A :

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} = 0,1256 \text{ м}^2$$

Так как $\frac{d_{отв}}{d_c} = \frac{250}{400} = 0,625$, из таблицы 2.5 $K_5 = 1,074$,

тогда

$$K_4 = \frac{K_5}{1 - A_0/A} = \frac{1,074}{1 - 4,9 \cdot 10^{-2} / 0,1256} = 1,761$$

$$U_{OTB} = 36,4 \cdot A_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot K_4 = 36,4 \cdot 4,9 \cdot 10^{-2} \cdot 1,761 \cdot \sqrt{\frac{298}{29}} = 10,069 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Проводимость соединительного патрубка рассчитывается как проводимость короткого трубопровода при молекулярном режиме, так как $l < 15 \cdot d$.

$$\frac{1}{U_{ПАТ}} = \frac{1}{U_{ТР-М}} + \frac{1}{U_{ОТВ-М}}$$

$$U_{ТР-М} = 38,1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} = 38,1 \cdot \frac{0,25^3}{0,2} \cdot \sqrt{\frac{298}{29}} = 9,542 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$U_{ОТВ-М} = 36,4 \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} = 36,4 \cdot 4,9 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{298}{29}} = 5,718 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\frac{1}{U_{ПАТ}} = \frac{1}{U_{ТР-М}} + \frac{1}{U_{ОТВ-М}} = \frac{1}{9,542} + \frac{1}{5,718} = 0,28 \text{ с}/\text{м}^3$$

$$U_{ПАТ} = 3,571 \text{ м}^3/\text{с}$$

Проводимость всей магистрали

$$\frac{1}{U_{\Sigma}} = \frac{1}{U_{ОТВ}} + \frac{1}{U_{ПАТ}} + \frac{1}{U_{ЗАТ}} = \frac{1}{10,069} + \frac{1}{3,571} + \frac{1}{4} = 0,629 \text{ с}/\text{м}^3$$

$$U_{\Sigma} = 1,59 \text{ м}^3/\text{с}.$$

8.3 Расчет эффективной быстроты откачки и давления в рабочей камере.

Используя основное уравнение вакуумной техники, рассчитывается эффективная быстрота откачки

$$S_0 = \frac{S_H U}{S_H + U},$$

где U – проводимость высоковакуумной системы, $\text{м}^3/\text{с}$;

S_H – быстрота действия основного насоса (по паспорту), $\text{м}^3/\text{с}$.

Таким образом, именно с такой скоростью будет производиться откачка вакуумной камеры выбранным основным насосом.

Затем по формуле

$$Q_{\Sigma} = p \cdot S_0,$$

где Q_{Σ} – суммарный поток газов, поступающих в рабочий объем, м³Па/с;

p – давление в рабочей камере, Па;

S_0 – эффективная быстрота откачки камеры при давлении P , м³/с.

Рассчитывается давление в рабочей камере в зависимости от времени откачки. Результат заносится в таблицу, и строится график зависимости $p(t)$. Т.е. выясняется, удовлетворяет ли сконструированная система требованиям технического задания (например, достижение необходимого давления за определенное время откачки).

Пример №9. Рассчитать давление в рабочей камере в процессе откачки в течение 2 часов. Быстроту действия насоса принять равной 1,9 м³/с. Исходные данные взять из примеров 4 и 8.

1. Рассчитаем эффективную скорость откачки рабочей камеры

Из примера 8 возьмем проводимость высоковакуумной системы $U_{\Sigma} = 1,59$ м³/с.

$$S_0 = \frac{S_H U_{\Sigma}}{S_H + U_{\Sigma}} = \frac{1,9 \cdot 1,59}{1,9 + 1,59} = 0,866 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Из примера 4 возьмем суммарный поток газовой выделенной Q_{Σ} , тогда по формуле $Q_{\Sigma} = p \cdot S_0$ определим давление в камере

Таблица 2.6

Результаты решения примера №9

t , сек	Q_{Σ} , м ³ Па/с	p , Па
1000	$1,655 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$
2000	$1,501 \cdot 10^{-4}$	$1,73 \cdot 10^{-4}$
3000	$1,361 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$
4000	$1,234 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-4}$
5000	$1,119 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$
6000	$1,015 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$
7200	$9,023 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$

8.4 Расчет времени предварительной откачки

1. В первую очередь необходимо определить границы режимов течения газа в трубопроводе предварительного разрежения.

2. Далее рассчитывается время откачки в диапазоне давлений от атмосферного до граничного давления $p_{ГР1}$ между вязкостным и молекулярно-вязкостным режимами. На этом этапе расчета полагаем, что $S_0 = S_H$, $Q_{\gamma} = 0$, следовательно, время откачки определяется по формуле

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1}{p_{ГР1}},$$

где V – объем рабочей камеры, м³;

S_0 – эффективная быстрота откачки камеры, м³/с;

p_1 – давление перед началом откачки, Па;

$p_{ГР1}$ – граничное давление между режимами, Па.

3. Затем производится расчет длительности откачки в диапазоне давлений $p_{ГР1}$ и $p_{ГР2}$, где $p_{ГР2}$ – граничное давление между молекулярно-вязкостным и молекулярным режимами.

Этот участок давлений необходимо разбить на меньшие участки, так как проводимость трубопровода переменна и сравнима также с изменяющейся быстротой действия насоса. Обычно разбивку ведут таким образом, чтобы давление в начале участка отличалось от конечного давления на этом участке примерно в 2 раза.

Проводимость магистрали, состоящей из нескольких участков, рассчитывается как

$$\frac{1}{U} = \sum \frac{1}{U_i}, \text{ если участки соединены последовательно}$$

$$U = \sum U_i, \text{ если участки соединены параллельно.}$$

Быстроту действия насоса S_H находят из зависимости $S_H(p)$ при рассчитанном давлении. График зависимости $S_H(p)$ обычно находится в паспорте насоса.

Затем из основного уравнения вакуумной техники находится эффективная быстрота откачки камеры.

Далее определяется время откачки на 1 участке, причем $Q_{\gamma} = 0$. Аналогично проводят расчет и для следующих участков. Однако, при приближении режима к молекулярному, следует учитывать Q_{γ} , и время откачки тогда будет находиться как

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1 - \frac{Q_\Sigma}{S_0}}{p - \frac{Q_\Sigma}{S_0}}.$$

Время откачки от атмосферного до необходимого давления определяется как сумма времен, полученных на всех участках при разных режимах течения газа. Если общее время откачки рабочей камеры меньше заданного в техническом задании, то насос предварительного разряжения выбран правильно.

Пример №10. Рассчитать время предварительной откачки рабочей камеры от атмосферного давления 10^5 Па до 10 Па. Суммарное газовыделение со стенок камеры Q равно $1,23 \cdot 10^{-4}$ м³Па/с и постоянно во времени, так как откачка кратковременна. Длина трубопровода – 900 мм, внутренний диаметр – 30 мм. Размеры камеры и магистрали указаны на рисунке. Низковакуумным насосом является пластинчато-роторный насос 2НВР-5ДМ.

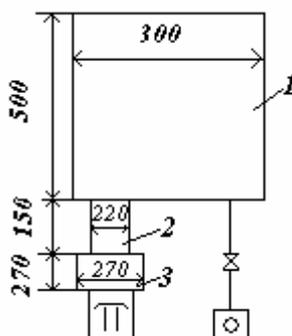


Рис. 33 К примеру расчета времени предварительной откачки

1. Определим границы режимов течения газа в трубопроводе предварительного разрежения

1.1 Граница между вязкостным и молекулярно-вязкостный режимом

$$p_{В.М-В} = \frac{1,33}{3 \cdot 10^{-2}} = 44,3 \text{ Па}$$

1.2 Граница между молекулярно-вязкостный и молекулярным режимом

$$P_{M-B.M} = \frac{0,02}{3 \cdot 10^{-2}} = 0,67 \text{ Па}.$$

2. Рассчитаем время откачки в диапазоне давлений от атмосферного до 44,3 Па, в котором быстрота действия механического вакуумного насоса постоянна и равна $S_H = 5,5 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 34), а проводимость трубопровода гораздо больше быстроты действия насоса.

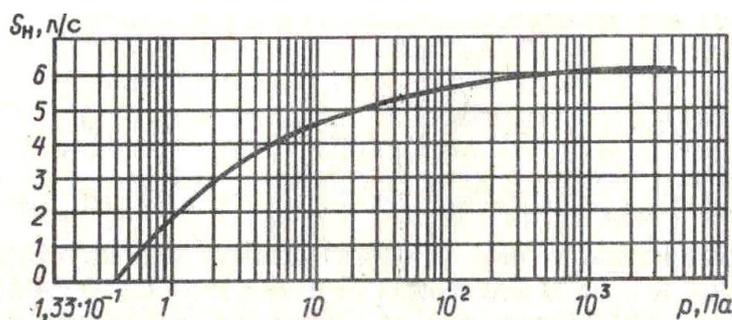


Рис. 34 Зависимость быстроты действия S_H от впускного давления p для механического вакуумного насоса 2HBP-5DM.

Время откачки рабочей камеры от атмосферного давления до 44,3 Па рассчитывается по формуле

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1 - \frac{Q_\Sigma}{S_0}}{p - \frac{Q_\Sigma}{S_0}},$$

в которой полагаем $S_0 = S_H$, $Q_\Sigma = 0$, так как газовыделение в этой области давлений можно не учитывать.

2.1. Откачиваемая зона состоит из камеры 1, соединительного патрубка 2 и корпуса затвора 3:

$$V_\Sigma = V_{\text{кам}} + V_{\text{патр}} + V_{\text{затв}} = \frac{\pi}{4} (300^2 \cdot 500 + 220^2 \cdot 150 + 270^2 \cdot 270) \cdot 10^{-9} = 5,65 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

2.2 Время откачки до давления 44,3 Па.

$$t_{10^5 \rightarrow 44,3} = \frac{5,65 \cdot 10^{-2}}{5,5 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{10^5}{44,3} = 79 \text{ сек}.$$

3. Рассчитаем время откачки в диапазоне давлений от 44,3 Па до 10 Па. Этот участок давлений необходимо разбить на меньшие участки, так как проводимость трубопровода переменна и сравнима также с изменяющейся быстротой действия насоса. Обычно разбивку ведут таким образом, чтобы давление в начале участка отличалось от конечного давления на этом участке примерно в 2 раза.

I) от 44,3 Па до 22 Па II) от 22 Па до 10 Па.

3.1. В диапазоне давлений 44,3 – 22 Па (молекулярно-вязкостный режим), т.е. при среднем давлении,

$$\bar{p} = \frac{44,3 + 22}{2} = 33,15 \text{ Па},$$

проводимость трубопровода определяется как $U_{M-B} = U_B + k \cdot U_M$, примем $k = 0,9$.

$$U_B = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{0,03^4}{0,9} \cdot 33,15 = 4,06 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$U_M = 121 \frac{d^3}{l} = 121 \cdot \frac{0,03^3}{0,9} = 3,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$U_{ТРУБ} = U_B + k \cdot U_M = 4,06 \cdot 10^{-2} + 0,9 \cdot 3,63 \cdot 10^{-3} = 4,39 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$$

Проводимость клапана ДУ-32 длиной 120 мм при среднем давлении 33,15 Па рассчитывается по формуле

$$U_{M-B} = U_M + \frac{U_B - U_M}{P_B - P_M} \cdot (p_i - P_M),$$

расчетная длина клапана определяется по формулам 2.24 и 2.25 табл.2.4.

$$l_{РАСЧ.КЛ} = \frac{1,3 \cdot 0,032}{0,1} = 0,416 \text{ м}$$

$$U_M = 121 \frac{d^3}{l} = 121 \cdot \frac{0,032^3}{0,416} = 9,531 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$l_{РАСЧ.КЛ} = 2,5 \cdot 0,12 = 0,3 \text{ м}$$

$$U_B = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{0,032^4}{0,3} \cdot 33,15 = 0,16 \text{ м}^3/\text{с}$$

Проводимость клапана при молекулярно-вязкостном режиме

$$U_{КЛ} = 9,531 \cdot 10^{-3} + \frac{0,16 - 9,531 \cdot 10^{-3}}{44,3 - 0,67} \cdot (33,15 - 0,67) = 0,12 \text{ м}^3/\text{с}$$

Проводимость всей магистрали

$$\frac{1}{U_{\Sigma}} = \frac{1}{U_{ТРУБ}} + \frac{1}{U_{КЛ}} = \frac{1}{4,39 \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{0,12} = 31,11 \text{ с}/\text{м}^3$$

$$U_{\Sigma} = 0,032 \text{ м}^3/\text{с}$$

Быстроту действия насоса берем по кривой $S_H(p)$ при давлении 33,15 Па, и она равна $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, тогда из основного уравнения вакуумной техники

$$S_0 = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,032}{5 \cdot 10^{-3} + 0,032} = 4,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

Время откачки от давления 44,3 Па до 22 Па

$$t_{44,3 \rightarrow 22} = \frac{5,65 \cdot 10^{-2}}{4,32 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{44,3}{22} = 9,15 \text{сек}$$

1.2. В диапазоне давлений 22 – 10 Па среднее давление –

$$\bar{p} = \frac{22+10}{2} = 16 \text{Па}$$

проводимость трубопровода определяется как $U_{M-B} = U_B + k \cdot U_M$,
примем $k = 0,9$.

$$U_B = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{0,03^4}{0,9} \cdot 16 = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$U_M = 121 \frac{d^3}{l} = 121 \cdot \frac{0,03^3}{0,9} = 3,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$U_{TPYB} = U_B + k \cdot U_M = 0,02 + 0,9 \cdot 3,63 \cdot 10^{-3} = 0,023 \text{ м}^3/\text{с}$$

Проводимость клапана ДУ-32 длиной 120 мм при среднем давлении 33,15 Па рассчитывается по формуле

$$U_{M-B} = U_M + \frac{U_B - U_M}{p_B - p_M} \cdot (p_i - p_M)$$

расчетная длина клапана определяется по формулам 2.24 и 2.25 табл.2.4.

$$l_{PACЧ.КЛ} = \frac{1,3 \cdot 0,032}{0,1} = 0,416 \text{ м}$$

$$U_M = 121 \frac{d^3}{l} = 121 \cdot \frac{0,032^3}{0,416} = 9,531 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$l_{PACЧ.КЛ} = 2,5 \cdot 0,12 = 0,3 \text{ м}$$

$$U_B = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{0,032^4}{0,3} \cdot 16 = 0,076 \text{ м}^3/\text{с}$$

Проводимость клапана при молекулярно-вязкостном режиме

$$U_{КЛ} = 9,531 \cdot 10^{-3} + \frac{0,076 - 9,531 \cdot 10^{-3}}{44,3 - 0,67} \cdot (16 - 0,67) = 0,033 \text{ м}^3/\text{с}$$

Проводимость всей магистрали

$$\frac{1}{U_{\Sigma}} = \frac{1}{U_{TPYB}} + \frac{1}{U_{КЛ}} = \frac{1}{0,023} + \frac{1}{0,033} = 73,78 \text{ с}/\text{м}^3$$

$$U_{\Sigma} = 0,014 \text{ м}^3/\text{с}$$

Быстроту действия насоса берем по кривой $S_H(p)$ при давлении 16 Па, и она равна $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, тогда из основного уравнения вакуумной техники

$$S_0 = \frac{4,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,014}{4,8 \cdot 10^{-3} + 0,014} = 3,574 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

Время откачки от давления 22 Па до 10 Па

$$t_{22 \rightarrow 10} = \frac{5,65 \cdot 10^{-2}}{3,574 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{22}{10} = 12,5 \text{ сек}$$

4. Суммарная длительность откачки рабочей камеры от атмосферного давления до 10 Па

$$t_{\Sigma} = 79 + 9,15 + 12,5 = 100,65 \text{ сек}$$

Часть 3 Методические указания по самостоятельной работе студентов

Примеры решения задач

При выполнении заданий необходимо обратить внимание на некоторые моменты.

Вакуумные насосы характеризуются следующими основными параметрами:

- быстротой действия насоса S_H ;
- предельным давлением насоса p_{np} ;
- давлением запуска вакуумного насоса p_3 ;
- наибольшим выпускным давлением $p_{вып}$.

Эффективная скорость откачки рабочего объема S_0 отличается от быстроты действия насосы и при большой проводимости трубопровода U , соединяющего насос с объемом, будет максимальна, то есть $S_0 \rightarrow S_H$. При этом коэффициент использования насоса будет максимальным, т.е. $K_H \rightarrow 1$.

При малой проводимости трубопровода $S_0 \rightarrow 0$ и $K_H \rightarrow 0$. Проводимость трубопроводов круглого сечения и других элементов вакуумных систем для различных режимов течения газа рассчитывается по формулам (2.18 – 2.27). Взаимосвязь трех параметров описывается основным уравнением вакуумной техники (ф. 1.3).

Предельное давление – это минимальное давление, которое устанавливается в процессе длительной откачки. Предельное давление в рабочем объеме p будет всегда выше, чем на входе насоса p_{np} , и это связано с ограниченной проводимостью трубопровода, то есть $p = p_{np} / K_H$.

При выборе вакуумных насосов должны выполняться два условия:

1. Предельное давление насоса p_{np} должно быть меньше, чем требуемое рабочее давление в объеме p , то есть $p_{np} \leq p \cdot K_H$. Если это условие не выполняется, то необходимо выбрать насос с меньшим предельным давлением.

2. Быстрота действия насоса S_H должна быть больше расчетного значения $S_H > S_{HРАСЧ}$. Таким образом, выбирают насос с характеристиками, соответствующими условиям 1 и 2.

Далее будут рассмотрены примеры решения задач.

1. Определить режим течения газа по длинному трубопроводу круглого сечения при откачке от давления 10^5 Па до давления 20 Па, диаметр равен 0,1 м.

Воспользуемся критерием Кнудсена:

$\bar{p}d \leq 0,02$ – молекулярный режим

$\bar{p}d \geq 1,33$ – вязкостный режим.

Определяем граничное давление для молекулярного режима:

$$\bar{p} \leq \frac{0,02}{d} \leq \frac{0,02}{0,1} \leq 0,2 \text{ Па}$$

Граничное давление для вязкостного режима:

$$\bar{p} \geq \frac{1,33}{d} \geq \frac{1,33}{0,1} \geq 13,3 \text{ Па}$$

Среднее давление:

$$\bar{p} = \frac{10^5 + 20}{2} = 5 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Таким образом, при данных условиях имеет место вязкостный режим течения газа.

2. Рассчитать проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения газа. Начальное давление равно 10^{-1} Па, конечное – 10^{-4} Па, диаметр равен 0,1 м, длина трубопровода – 0,2 м.

Определяем среднее давление и проверяем выполнение условия для молекулярного режима:

$$\bar{p} = \frac{10^{-1} + 10^{-4}}{2} = 0,05 \text{ Па}$$

$\bar{p} \cdot d = 0,05 \cdot 0,1 = 0,005 < 0,02 \text{ Па} \cdot \text{м}$, т.е. имеет место молекулярный режим, для которого проводимость не зависит от давления и рассчитывается по формуле:

$$U_M = 38,1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}$$

В расчетах принимаем молекулярную массу газа $M = 29$ и температуру газа $T = 300 \text{ К}$.

$$U_M = 38,1 \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}} = 38,1 \frac{0,1^3}{0,2} \sqrt{\frac{300}{29}} = 0,613 \text{ м}^3/\text{с}$$

3. Рассчитать эффективную скорость откачки, если быстрота действия насоса $1 \text{ м}^3/\text{с}$, а проводимость трубопровода $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$. Определить коэффициент использования насоса.

Для расчета воспользуемся основным уравнением вакуумной техники:

$$S_0 = \frac{S_H \cdot U}{S_H + U},$$

то есть

$$S_0 = \frac{S_H U}{S_H + U} = \frac{1 \cdot 0,1}{1 + 0,1} = 0,09 \text{ м}^3/\text{с}$$

Коэффициент использования насоса определяется соотношением

$$K_{и} = \frac{S_0}{S_H} = \frac{0,09}{1} = 0,09$$

4. Выбрать вакуумный насос для установившегося режима, если требуется обеспечить скорость откачки рабочего объема $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ при $p = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ и $K_{и} = 0,5$. Принять, что p_{np} должно быть меньше $K_{и} p$ в 2 раза.

При выборе насоса должны выполняться 2 условия:

- $S_H >$ расчетного значения,
- p_{np} меньше $K_{и} \cdot p$.

Из условия задачи принимаем

$$p_{np} = \frac{K_{и} \cdot p}{2} = \frac{0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{2} = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$$

Рассчитываем требуемую быстроту действия насоса по формуле

$$S_{н} = \frac{S_0}{K_{и} \cdot (1 - p_{np} / K_{и} \cdot p)} = \frac{0,1}{0,5 \cdot \left(1 - \frac{1,25 \cdot 10^{-4}}{0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}\right)} = 0,4 \text{ м}^3/\text{с}$$

Далее по справочнику выбираем насос, который обеспечивал бы $S_H > 0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ и давление $p_{np} < 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$

5. Рассчитать степень сжатия диффузионного насоса для воздуха и масла ВМ-1. Для расчетов воспользуемся данными из приложения (табл. 3 и табл. 8)

ВМ-1: $M = 450 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $\sigma = 10 \text{ нм}$, $V_n = 200 \text{ м/с}$, $L = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $T_n = 473 \text{ К}$, $p_n = 66,5 \text{ Па}$

Воздух: $M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $\sigma = 0,375 \text{ нм}$

Степень сжатия газа в струе есть отношение выпускного давления к предельному давлению и описывается уравнением

$$\frac{p_{вып}}{p_{np}} = \exp\left(\frac{v_{п} L}{D_{гп}}\right)$$

Рассчитываем коэффициент диффузии газа через струю пара на выпускную сторону насоса

$$D_{\Gamma\Pi} = 85,1 \cdot 10^{-23} \left(\frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \right)^{1/2} (\sigma_1 + \sigma_2)^{-2} T_{\Pi}^{3/2} p_{\Pi}^{-1}$$

$$D_{\Gamma\Pi} = 85,1 \cdot 10^{-23} \left(\frac{450 \cdot 10^{-3} + 29 \cdot 10^{-3}}{450 \cdot 10^{-3} \cdot 29 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/2} (10 \cdot 10^{-9} + 0,375 \cdot 10^{-9})^{-2} 473^{3/2} 66,5^{-1} = 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$$

Степень сжатия рассчитывается при длине струи $(2-5) \cdot 10^{-2}$ м.

$$\frac{p_{\text{вып}}}{p_{\text{пр}}} = \exp\left(\frac{\nu_{\Pi} L}{D_{\Gamma\Pi}}\right) = \exp\left(\frac{200 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{7,4 \cdot 10^{-3}}\right) = 222$$

6. Рассчитать предельное давление криоконденсационного насоса при откачке азота при температуре криопанели $T_k = 30$ К. Температуру газа принять $T_g = 300$ К.

Предельное давление при криоконденсационной откачке рассчитывается следующим образом

$$p_{\text{пр}} = p_{\text{нас}} \sqrt{\frac{T_g}{T_k}}$$

Из приложения (рис. П1) видно, что давление насыщенного пара азота при температуре криопанели 30 К равно $p_{\text{нас}} = 10^{-2}$ Па.

Тогда

$$p_{\text{пр}} = 10^{-2} \sqrt{\frac{300}{30}} = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$$

7. Определить начальное давление, с которого насос начал откачку объема $V=0,1$ м³ до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па, если быстрота откачки $S_0 = 0,005$ м³/с, а время откачки составляет 50 секунд.

Время откачки рабочей камеры без учета газовыделения Q_{Σ} определяется как

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Следовательно, начальное давление

$$p_1 = p_2 \cdot \exp\left(\frac{t \cdot S_0}{V}\right) = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(\frac{50 \cdot 0,005}{0,1}\right) = 0,06 \text{ Па}$$

Задания для аудиторных практических занятий

Вариант №1

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 1,1$; $d = 2$ см; $p_1 = 10^3$ Па; $p_2 = 20$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке H_2 , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа 10 Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – He, $V_k = 30$ л, $V_a = 25$ л, $n = 3$, $p_0 = 0,1$ Па.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке воздуха и гелия. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки по воздуху. Масло – VM-1, $L = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $A = 4 \cdot 10^{-3}$ м².

Вариант №2

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 2$, $d = 3$ см, $p_1 = 10^2$ Па, $p_2 = 10$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке He, температура газа 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа 1,5 Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – He, $V_k = 50$ л, $V_a = 20$ л, $p_0 = 3 \cdot 10^{-2}$ Па, $n = 2$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке водорода, если диффузионный насос работает на маслах: силикон 705 и октойл. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки. $L = 3 \cdot 10^{-4}$ м, $A = 5 \cdot 10^{-3}$ м².

Вариант №3

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 2,7$; $d = 4$ см; $p_1 = 10^3$ Па; $p_2 = 1$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне $(10^{-4} - 10^{-8})$ Па при откачке N_2 , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа 1 Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – H_2 , $V_k = 100$ л, $V_a = 15$ л, $n = 3$, $p_0 = 0,1$ Па.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке аргона и водорода. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки по аргону. Масло – силикон 704, $L = 2 \cdot 10^{-4}$ м, $A = 7 \cdot 10^{-3}$ м².

Вариант №4

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 5$, $d = 5$ см, $p_1 = 10^2$ Па, $p_2 = 40$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне $(10^{-4} - 10^{-8})$ Па при откачке CO_2 , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа 0,1 Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – N_2 , $V_k = 100$ л, $V_a = 1$ л, $n = 2$, $p_0 = 0,1$ Па.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке углекислого газа, если диффузионный насос работает на маслах: силикон 705 и октойл. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки. $L = 4 \cdot 10^{-4}$ м, $A = 8 \cdot 10^{-3}$ м².

Вариант №5

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима.

Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 3,2$; $d = 7$ см; $p_1 = 3 \cdot 10^3$ Па; $p_2 = 1,5 \cdot 10^2$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке H_2O , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа 0,5 Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – He, $V_k = 50$ л, $V_a = 30$ л, $n=3$, $p_0 = 1,5 \cdot 10^{-2}$ Па.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке криптона и гелия. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки по гелию. Масло – VM-5, $L=5 \cdot 10^{-4}$ м, $A=0,01$ м².

Вариант №6

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d=4,6$; $d = 6$ см; $p_1=8 \cdot 10^2$ Па; $p_2=10$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке Hg, температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа 10^{-2} Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – Ne, $V_k = 30$ л, $V_a = 25$ л, $p_0 = 5 \cdot 10^{-2}$ Па, $n=3$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке криптона, если диффузионный насос работает на масле: силикон 704 и октойл. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки. $L=3 \cdot 10^{-4}$ м, $A=0,02$ м²

Вариант №7

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 7$, $d = 10$ см, $p_1 = 40$ Па, $p_2 = 5$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке H_2 , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа 7,5 Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – H_2 , $V_k = 50$ л, $V_a = 10$ л, $n = 2$, $p_0 = 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке азота и воды. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки по азоту. Масло – силикон 704, $L = 2 \cdot 10^{-4}$ м, $A = 0,05$ м².

Вариант №8

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 10$, $d = 8$ см, $p_1 = 70$ Па, $p_2 = 1$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке Ne, температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа $3 \cdot 10^{-2}$ Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – N_2 , $V_k = 100$ л, $V_a = 5$ л, $n = 2$, $p_0 = 0,9$ Па.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке неона, если диффузионный насос работает на маслах: силикон 705 и ВМ-5. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки. $L = 4 \cdot 10^{-4}$ м, $A = 0,08$ м².

Вариант №9

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 9$, $d = 15$ см, $p_1 = 20$ Па, $p_2 = 8$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке N_2 , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа 1,2 Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – цеолит, газ – N_2 , $V_k = 100$ л, $V_a = 1$ л, $p_0 = 10$ Па, $n = 2$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке кислорода и ксенона. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки по кислороду. Масло – ВМ-5, $L = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $A = 0,1$ м².

Вариант №10

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 5,4$; $d = 11$ см; $p_1 = 10^2$ Па; $p_2 = 15$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке CO_2 , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа $8 \cdot 10^{-2}$ Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – силикагель, газ – N_2 , $V_k = 150$ л, $V_a = 0,5$ л, $p_0 = 25$ Па, $n = 2$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке воздуха, если диффузионный насос работает на маслах: октоил и силикон 704. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки. $L = 4 \cdot 10^{-4}$ м, $A = 0,11$ м².

Вариант №11

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 10,5$; $d = 13,5$ см; $p_1 = 25$ Па; $p_2 = 4$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке H_2O , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа $8 \cdot 10^{-1}$ Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – H_2 , $V_k = 50$ л, $V_a = 1,5$ л, $p_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ Па, $n = 3$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке водорода и ртути. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки по водороду. Масло – силикон 704, $L=3 \cdot 10^{-4}$ м, $A=0,13$ м².

Вариант №12

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d=20$, $d=12$ см, $p_1=10^3$ Па, $p_2=10$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке Hg, температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа $1,5 \cdot 10^{-2}$ Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – He, $V_k=100$ л, $V_a=30$ л, $p_0=4 \cdot 10^{-3}$ Па, $n=3$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке аргона, если диффузионный насос работает на маслах: октойл и силикон 705. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки. $L=2 \cdot 10^{-4}$ м, $A=0,15$ м².

Вариант №13

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d=12$, $d=14$ см, $p_1=48$ Па, $p_2=20$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке H₂, температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа $3 \cdot 10^{-1}$ Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – цеолит, газ – N₂, $V_k=100$ л, $V_a=5$ л, $p_0=48$ Па, $n=2$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке CO₂ и гелия. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки по углекислому газу. Масло – ВМ-1, $L=5 \cdot 10^{-4}$ м, $A=0,163$ м².

Вариант №14

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d=25$, $d=5$ см, $p_1=90$ Па, $p_2=15$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке Ne, температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа $1,5 \cdot 10^{-3}$ Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – силикагель, газ - N_2 , $V_k=150$ л, $V_a=1$ л, $p_0=100$ Па, $n=2$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке гелия, если диффузионный насос работает на маслах: октойл и силикон 704. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки. $L=3 \cdot 10^{-4}$ м, $A=0,157$ м².

Вариант №15

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d=22$, $d=10$ см, $p_1=60$ Па, $p_2=20$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке N_2 , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа $5 \cdot 10^{-2}$ Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ - Ne, $V_k=50$ л, $V_a=5$ л, $p_0=10$ Па, $n=2$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке криптона и водорода. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки по криптону. Масло – силикон 704, $L=4 \cdot 10^{-4}$ м, $A=0,17$ м².

Вариант №16

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима.

Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 30$, $d = 15$ см, $p_1 = 10^2$ Па, $p_2 = 80$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке Hg, температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа $8 \cdot 10^{-3}$ Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – H_2 , $V_k = 30$ л, $V_a = 5$ л, $p_0 = 14$ Па, $n = 3$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке азота, если диффузионный насос работает на маслах: силикон 705 и ВМ-1. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки. $L = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м, $A = 0,168$ м².

Вариант №17

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 35$, $d = 7$ см, $p_1 = 95$ Па, $p_2 = 35$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке N_2 , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа 10^{-2} Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ - Ne, $V_k = 30$ л, $V_a = 1$ л, $p_0 = 33$ Па, $n = 4$

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке неона и воздуха. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки по неону. Масло – ВМ-1, $L = 3,3 \cdot 10^{-4}$ м, $A = 0,144$ м².

Вариант №18

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 2$, $d = 12$ см, $p_1 = 10^3$ Па, $p_2 = 55$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке N_2 , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа 7 Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ – N_2 , $V_k = 50$ л, $V_a = 15$ л, $n=3$, $p_0 = 15,9$ Па.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке кислорода, если диффузионный насос работает на маслах: силикон 705 и октойл. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки. $L=4,7 \cdot 10^{-4}$ м, $A=0,14$ м².

Вариант №19

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d=25$, $d=14$ см, $p_1=115$ Па, $p_2=5$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке H_2O , температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа $4 \cdot 10^{-2}$ Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – активированный уголь, газ - He, $V_k = 50$ л, $V_a = 15$ л, $p_0 = 10^0$ Па, $n=2$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке аргона и ртути. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки по аргону. Масло – октойл, $L=2,1 \cdot 10^{-4}$ м, $A=0,152$ м².

Вариант №20

1) Рассчитать проводимость трубопроводов различных диаметров в зависимости l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима. Рассчитать эффективную скорость откачки и коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Исходные данные: $l/d = 15$, $d=10$ см, $p_1=195$ Па, $p_2=2$ Па.

2) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения p_{np} в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке He, температура газа – 300 К. Рассчитать скорость откачки криоконденсационных насосов при давлении газа 10 Па.

3) Рассчитать p_{np} , которое можно получить с помощью криосорбционной откачки с одним и несколькими насосами параллельно подключенными к объекту. Температура адсорбента – 77 К. Адсорбент – силикагель, газ – N_2 , $V_k = 150$ л, $V_a = 5$ л, $p_0 = 10$ Па, $n = 2$.

4) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса при откачке криптона, если диффузионный насос работает на маслах: VM-1 и силикон 704. Определить вакуум-фактор и реальную скорость откачки. $L = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м, $A = 0,01$ м².

Индивидуальные задания

1) Разработать вакуумную систему для получения давления в камере $3 \cdot 10^{-3}$ Па, используя в качестве насосов для получения вакуума криогенный и механический. Выбрать конкретный тип насосов, если суммарное газовыделение и натекание составляет $5 \cdot 10^{-4}$ м³·Па/с. Время предварительной откачки камеры вместимостью 25 л до давления запуска высоковакуумного насоса – не более 10 мин.

2) Разработать вакуумную систему для получения давления в камере $8 \cdot 10^{-6}$ Па, используя в качестве насосов для получения вакуума магниторазрядный и механический. Выбрать конкретный тип насосов, если суммарное газовыделение и натекание составляет $2 \cdot 10^{-3}$ м³·Па/с. Время предварительной откачки камеры вместимостью 35 л до давления запуска высоковакуумного насоса – не более 15 мин.

3) Рассчитать давление в камере в процессе откачки диффузионным насосом в течение 1 часа. Считать, что суммарный поток газовыделения и натекания в начале откачки равен $3 \cdot 10^{-4}$ м³Па/с и уменьшается в 2 раза каждые 20 минут откачки.

Высоковакуумная магистраль состоит из отверстия на выходе из камеры диаметром 200 мм, патрубка диаметром 200 мм и длиной 450 мм и затвора. Проводимость затвора, установленного на входном отверстии высоковакуумного насоса, равна 6 м³/с.

4) Спроектировать вакуумную систему установки, обеспечивающую возможность получения высокого вакуума. Исходные данные: суммарное газовыделение и натекание $5 \cdot 10^{-4}$ м³·Па/с, рабочее давление в камере – $6 \cdot 10^{-4}$ Па, объем камеры – 20 л. Дополнительные условия – использование криогенного и вращательного насосов. Время предварительной откачки камеры до давления запуска высоковакуумного насоса – не более 10 мин.

5) Рассчитать давление в камере в процессе откачки диффузионным насосом в течение 2 часов. Считать, что суммарный поток газовыделения и натекания в начале откачки равен $4 \cdot 10^{-4}$ м³Па/с и уменьшается в 2 раза каждые 30 минут откачки.

Высоковакуумная магистраль состоит из отверстия на выходе из камеры диаметром 200 мм, патрубка диаметром 200 мм и длиной 500 мм и затвора. Проводимость затвора, установленного на входном отверстии высоковакуумного насоса, равна 5 м³/с.

6) Рассчитать время предварительной откачки рабочей камеры от атмосферного давления 10^5 Па до 10 Па. Суммарное газовыделение со стенок камеры Q равно 10^{-4} м³Па/с и постоянно во времени, так как откачка кратковременна. Длина трубопровода – 700 мм, внутренний диа-

метр – 30 мм. Низковакуумным насосом является пластинчатороторный насос 2НВР-5ДМ. Размеры камеры и магистрали выдаются преподавателем.

7) Рассчитать время предварительной откачки рабочей камеры от атмосферного давления 10^5 Па до 10 Па. Суммарное газовыделение со стенок камеры Q равно $7 \cdot 10^{-5}$ м³Па/с и постоянно во времени, так как откачка кратковременна. Длина трубопровода – 1000 мм, внутренний диаметр – 25 мм. Размеры камеры и магистрали выдаются преподавателем.

8) Рассчитать время предварительной откачки рабочей камеры от атмосферного давления 10^5 Па до 10 Па. Суммарное газовыделение со стенок камеры Q равно $8 \cdot 10^{-4}$ м³Па/с и постоянно во времени, так как откачка кратковременна. Длина трубопровода – 950 мм, внутренний диаметр – 35 мм. На входе высоковакуумного насоса расположена охлаждаемая ловушка. Размеры камеры и магистрали выдаются преподавателем.

9) Рассчитать время предварительной откачки рабочей камеры от атмосферного давления 10^5 Па до 10 Па. Суммарное газовыделение со стенок камеры Q равно $8 \cdot 10^{-3}$ м³Па/с и постоянно во времени, так как откачка кратковременна. Длина трубопровода – 1200 мм, внутренний диаметр – 40 мм. На входе высоковакуумного насоса расположена охлаждаемая ловушка. Размеры камеры и магистрали выдаются преподавателем.

10) Определить при молекулярном режиме течения газа проводимость магистрали, соединяющей вакуумную камеру с высоковакуумным насосом. Откачиваемый газ – воздух, температура газа 298 К.

Проводимость затвора, установленного на входном отверстии высоковакуумного насоса, равна 5 м³/с.

Магистраль состоит из отверстия на выходе из камеры диаметром 400 мм, патрубка диаметром 400 мм и длиной 500 мм и затвора.

11) Определить при молекулярном режиме течения газа проводимость магистрали, соединяющей вакуумную камеру с высоковакуумным насосом. Откачиваемый газ – воздух, температура газа – 298 К.

Проводимость затвора, установленного на входном отверстии высоковакуумного насоса, равна 3 м³/с.

Магистраль состоит из отверстия на выходе из камеры диаметром 300 мм, патрубка диаметром 300 мм и длиной 350 мм, азотной ловушки с длиной 400 мм и высотой 200 мм и затвора.

12) Определить при молекулярном режиме течения газа проводимость магистрали, соединяющей вакуумную камеру с высоковакуумным насосом. Откачиваемый газ – аргон, температура газа – 298 К.

Проводимость затвора, установленного на входном отверстии высоковакуумного насоса, равна $4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Магистраль состоит из отверстия на выходе из камеры диаметром 150 мм, патрубка диаметром 150 мм и длиной 300 мм, азотной ловушки с длиной 300 мм и высотой 150 мм и затвора.

13) Спроектировать вакуумную систему установки, обеспечивающую возможность получения высокого вакуума. Исходные данные: суммарное газовыделение и натекание – $10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$, рабочее давление в камере – $3 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$, объем камеры – 40 л. Дополнительные условия – использование турбомолекулярного и вращательного насосов. Время предварительной откачки камеры до давления запуска высоковакуумного насоса – не более 15 мин.

14) Рассчитать давление в камере в процессе откачки магниторазрядным насосом в течение 1,5 часов. Считать, что суммарный поток газовыделения и натекания в начале откачки равен $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па}/\text{с}$ и уменьшается в 2 раза каждые 30 минут откачки.

Высоковакуумная магистраль состоит из отверстия на выходе из камеры диаметром 350 мм, патрубка диаметром 350 мм и длиной 600 мм и затвора. Проводимость затвора, установленного на входном отверстии высоковакуумного насоса, равна $4 \text{ м}^3/\text{с}$.

15) Спроектировать вакуумную систему установки, обеспечивающую возможность получения высокого вакуума. Исходные данные: суммарное газовыделение и натекание – $7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$, рабочее давление в камере – 10^{-5} Па , объем камеры – 30 л. Дополнительные условия – использование пароструйного и вращательного насосов. Время предварительной откачки камеры до давления запуска высоковакуумного насоса – не более 10 мин.

Список литературы

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 2007. – 391 с.
2. Пипко А.И. Основы вакуумной техники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 334 с.
3. Вакуумная техника / под ред. Е.С. Фролова. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
4. Компания «Гидромех» // www.gidromeh.ru
5. ОАО «Вакууммаш» // <http://vacma.ru>
6. Компания «Криосистемы» // www.cryosystems.com.ru
7. Вакуумные насосы и системы Busch // www.busch.ru
8. Компания ИНТЕК АНАЛИТИКА // www.invac.ru
9. ООО "ВАКУУМ-СЕРВИС" // www.vacservice.ru
10. ООО «ПРОМТЕХИМПЭКС» // www.vacuum-pump.ru
11. Компания «КУРБАТ GLOBAL» // www.becker-international.ru

Приложение

Таблица 1

Основные технические данные промышленных теческателей [2]

Тип	Модель	Пробное вещество	Минимальный обнаруживаемый поток пробного вещества, м ³ Па/с
Галогенный	ГТИ-6	Хладон-12	10 ⁻⁹
	БГТИ-7	Хладон-12	3·10 ⁻⁷
Электронно-захватный	13ТЭ-9-001	Хладон-12	(2-5)·10 ⁻¹⁰
Масс-спектрометрический	ТИ1-14	Гелий	7·10 ⁻¹³
	СТИ-11	Гелий	5·10 ⁻¹³
	ПТИ-14	Гелий	10 ⁻¹²

Таблица 2

Состав атмосферного воздуха

Газ	Состав, %	Парциальное давление, Па
N ₂	78,08	7,9·10 ⁴
O ₂	20,95	2,12·10 ⁴
Ar	0,93	9,32·10 ²
CO ₂	0,033	33,2
Ne	1,8·10 ⁻³	1,86
He	5,24·10 ⁻⁴	0,53
CH ₄	2·10 ⁻⁴	0,2
Kr	1,1·10 ⁻⁴	11,3·10 ⁻²
H ₂	5·10 ⁻⁵	5,06·10 ⁻²
N ₂ O	5·10 ⁻⁵	5,06·10 ⁻²
Xe	8,7·10 ⁻⁶	8,8·10 ⁻³
O ₃	7·10 ⁻⁶	7,05·10 ⁻³
H ₂ O	1,57	1,58·10 ⁻³

Таблица 3

Некоторые параметры газов

газ	$\lambda \cdot 10^8$, м	σ , нм	М, г/моль	$m \cdot 10^{26}$, кг	$\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	Т, К	χ	$\eta \cdot 10^5$, Па·с	$U_a \cdot 10^{-2}$, м/с	
									273 К	298 К
H ₂	11,04	0,275	2	0,3347	0,118	192,3 272,1	1,41	0,666 0,830	16,93	17,70
He	17,53	0,218	4	0,6646	0,235	273,1 293,1	1,66	1,876 1,970	12,01	12,56
Ne	12,42	0,26	20	3,351	1,180	194,7 273,1	1,64	2,367 2,973	5,355	5,594
Воз- дух	5,98	0,374	29	4,811	1,7	273,1 293,1 573,1	1,4	1,709 1,808 2,946	5,468	5,668
O ₂	6,33	0,364	32	5,313	1,89	82 273,1 296,1	1,4	0,65 1,92 2,039	4,252	4,442
Ar	6,20	0,367	40	6,631	2,35	273,1 288,5	1,67	2,096 2,196	3,805	3,976
CO ₂	3,88	0,465	44	7,038	2,6	194,7 273,1	1,3	1,033 1,38	3,624	3,787
Kr	4,85	0,415	83	13,9	4,88	273,1 289,4	1,68	2,334 2,459	2,629	2,747
Xe	3,47	0,491	130	21,8	7,7	273,1 288,4	1,66	2,107 2,222	2,099	2,193
N ₂	5,99	0,38	28	4,652	1,64	273,1 289,2	1,4	1,657 1,728	4,542	4,745
H ₂ O	-	0,468	18	2,992	1,055	288,1 298,1	1,33	0,926 0,964	5,665	5,919

где λ – средняя длина свободного пробега молекулы при атмосферном давлении и температуре 273 К; σ – диаметр молекулы; М – молярная масса; m – масса молекулы; χ – показатель адиабаты; ρ – плотность газа при давлении 133 Па и температуре 273 К; η – коэффициент динамической вязкости газа; U_a – средняя арифметическая скорость молекул газа.

Таблица 4

Проницаемость материалов

Материал	Температура, К	Газ	Удельный поток проницаемости q , $\text{м}^3\text{Па}/(\text{м}^2\text{с})$
Fe	298	H ₂	$1,7 \cdot 10^{-11}$
	1095	N ₂	$8,97 \cdot 10^{-9}$
	965	CO	$7,48 \cdot 10^{-9}$
Ni	681	H ₂	$7,58 \cdot 10^{-8}$
Pb	342	H ₂	$7,8 \cdot 10^{-9}$
Нержавеющая сталь	298	H ₂	$7 \cdot 10^{-11}$
Mo	871	H ₂	$7,3 \cdot 10^{-9}$
	1635	N ₂	$7,7 \cdot 10^{-9}$
Cu	814	H ₂	$7,7 \cdot 10^{-9}$
Ag	913	O ₂	$7,7 \cdot 10^{-9}$
Pt	702	H ₂	$7 \cdot 10^{-9}$
Al	773	H ₂	$7,7 \cdot 10^{-11}$
Стекло жаропрочное	473	He	10^{-13}
Кварц	423	He	$5,8 \cdot 10^{-13}$
	1173	H ₂	$4,8 \cdot 10^{-13}$
	1173	O ₂	$6,8 \cdot 10^{-13}$
	1173	Ar	$4,4 \cdot 10^{-13}$
	873	Ne	$2,1 \cdot 10^{-13}$
Керамика	1712	воздух	$3,9 \cdot 10^{-13}$
Резина 7889	298	N ₂	$8,3 \cdot 10^{-12}$
Резина 9024	298	N ₂	$7,1 \cdot 10^{-13}$
Фторопласт - 4	293	H ₂	$7,89 \cdot 10^{-12}$
	293	He	$2,41 \cdot 10^{-11}$
	293	He	$8,27 \cdot 10^{-13}$
	293	O ₂	$1,88 \cdot 10^{-12}$
Полиэтилен высокой плотности	323	H ₂	$9 \cdot 10^{-12}$
Полиамид	323	H ₂	$2,3 \cdot 10^{-12}$

Удельные потоки проницаемости даны при давлении 1 Па и указанных температур для материала толщиной 1 м. Для подсчета удельного потока q_1 при иных давлениях P и толщинах Z и при той же температуре следует использовать уравнение $q_1 = qP^{1/j}/Z$, $j = 1$ для неметаллов, $j = 2$ для металлов.

Таблица 5

Скорость удельного газовыделения q с поверхности металлов при комнатной температуре [2]

Металл	Предварительная обработка металла	q , $\text{м}^3\text{Па} / (\text{м}^2\text{с})$	Длительность откачки, после которой проводилось измерение, ч.	Коэффициенты в уравнении (2.9)	
				$A_{\text{ДЕС}}$	$B_{\text{ДЕС}}$
Малоуглеродистая сталь	-	$4,12 \cdot 10^{-4}$ $7,3 \cdot 10^{-5}$	1 6	-3,236 -	$4,16 \cdot 10^{-5}$ -
	После отжига в вакууме при 693 К	$4 \cdot 10^{-10}$ - $1,2 \cdot 10^{-8}$	Не изменяется во времени	-	-
Нержавеющая сталь	-	$2,4 \cdot 10^{-4}$ $4,12 \cdot 10^{-5}$	1 6	-3,467 -	$4,25 \cdot 10^{-5}$ -
	Необработанная	$1,7 \cdot 10^{-4}$ $1,97 \cdot 10^{-5}$	1 5	-3,396 -	$7,33 \cdot 10^{-5}$ -
	После отжига в вакууме при 693 К	$4 \cdot 10^{-10}$ - $1,2 \cdot 10^{-8}$	Не изменяется во времени	-	-
Медь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	$1,11 \cdot 10^{-5}$ $8,35 \cdot 10^{-7}$	1 5	-4,382 -	$1,04 \cdot 10^{-4}$ -
	Промывка в бензоле и ацетоне	$6,12 \cdot 10^{-5}$ $1,03 \cdot 10^{-5}$	1 5	-3,918 -	$5,85 \cdot 10^{-5}$ -
	Необработанная	$1,95 \cdot 10^{-4}$ $6,4 \cdot 10^{-5}$	1 5	-3,486 -	$3,98 \cdot 10^{-5}$ -
	После отжига в вакууме при 693 К	$1,06 \cdot 10^{-10}$ - $9,3 \cdot 10^{-9}$	Не изменяется во времени	-	-
Латунь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	$1,95 \cdot 10^{-5}$ $1,53 \cdot 10^{-6}$	1 5	-4,176 -	$9,16 \cdot 10^{-5}$ -
	Промывка в бензоле и ацетоне	$2,22 \cdot 10^{-4}$ $8,9 \cdot 10^{-6}$	1 5	-3,39 -	$3,7 \cdot 10^{-5}$ -
	Необработанная	$3,34 \cdot 10^{-4}$ $1,2 \cdot 10^{-4}$	1 5	-3,35 -	$3,14 \cdot 10^{-5}$ -
Дюралюминий	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	$4,73 \cdot 10^{-5}$ $3,9 \cdot 10^{-6}$	1 5	-3,946 -	$8,12 \cdot 10^{-5}$ -
	Промывка в бензоле и ацетоне	$2,8 \cdot 10^{-4}$ $1,4 \cdot 10^{-4}$	1 5	-3,231 -	$3,48 \cdot 10^{-5}$ -
	Необработанная	$5,57 \cdot 10^{-4}$ $1,9 \cdot 10^{-4}$	1 5	-3,256 -	$2,78 \cdot 10^{-5}$ -
Никель	Необработанный	$(6,5-8)_6 \cdot 10^{-7}$	2	-	-
Молибден	Необработанный	$(4,6-8,5) \cdot 10^{-6}$	2	-	-
Вольфрам	Необработанный	$1,3 \cdot 10^{-6}$	2	-	-
	Необработанный	$6 \cdot 10^{-6}$	2	-	-

Таблица 6

Количество газов, содержащихся в сталях и сплавах

Материал	Газосодержание							
	Кислород		Азот		Водород		Всего газов	
	м ³ Па/ кг	м ³ Па/м ³	м ³ Па/ кг	м ³ Па/ м ³	м ³ Па/ кг	м ³ Па/ м ³	м ³ Па/ кг	м ³ Па/ м ³
Сталь 12Х18Н10Т	2,25	17,5·10 ³	5,1	40,3·10 ³	6,5-11	(51,4-87) ·10 ³	13-18	(10,3-14,3) ·10 ⁴
Сталь 10	9,0	71·10 ³	3,5	27,6·10 ³	2,15	17·10 ³	14,65	11,5·10 ⁴
Сталь 20	2,25	17,6·10 ³	3,44	29·10 ³	2,15	16,9·10 ³	8,1	63,5·10 ³
Электротехни- ческое железо	7,5	58,9·10 ³	3,18	25·10 ³	12	94·10 ³	22,68	17,8·10 ⁴
Сталь ШХ15	4,1	32·10 ³	-	-	-	-	-	-
Сталь 30ХГСА	3,0	23,5·10 ³	3,43	27·10 ³	13	10,2·10 ³	7,73	60,6·10 ³
Сталь электро- техническая тонколистовая	12,9	1·10 ³	-	-	3·10 ⁻⁴	2,32	12,9	10 ⁵

Таблица 7

Коэффициенты диффузии газов в твердых телах

Материал	Газ	Температура, К	Коэффициент диффузии, м ² /с
Железо	H ₂	1073	2,1·10 ⁻⁸
	O ₂	1273	7,5·10 ⁻¹⁴
	CO	-	-
	C	1273	2·10 ⁻¹¹
	N ₂	1273	1,35·10 ⁻¹¹
Нержавеющая сталь	H ₂	1023	3,4·10 ⁻¹⁰
Никель	H ₂	398	3,4·10 ⁻¹²
	O ₂	1273	2,36·10 ⁻¹³
	CO	1273	4·10 ⁻¹²
Свинец	H ₂	350	10 ⁻¹⁰
Медь	O ₂	900	10 ⁻¹²

Таблица 8

Характеристики масел для диффузионных насосов

Название масла	M_0 , г/моль	Плотность, г/см ³	Температура, К (при $p_{и} = 66,5$ Па)
Октойл	425	0,91	475
Силикон 704	484	1,07	495
Силикон 705	546	1,09	520
ВМ-1 (ВМ - 5)	450	0,885	473

Примечание: 1) средний диаметр молекулы масла составляет $\sigma = 10$ нм, 2) скорость струи пара зависит от конструкции сопла и в среднем составляет 200 м/с

Таблица 9

Значения коэффициента адсорбируемости газов K_T при различных температурах адсорбентов

Адсорбент	$T_k = 77$ К				$T_k = 298$ К			
	He	Ne	H ₂	N ₂	He	Ne	H ₂	N ₂
Активированный уголь	2	20	1600	10^8	-	-	-	10^2
Цеолит	-	-	-	10^8	-	-	-	10^3
Силикагель	-	-	-	10^7	-	-	-	10^2

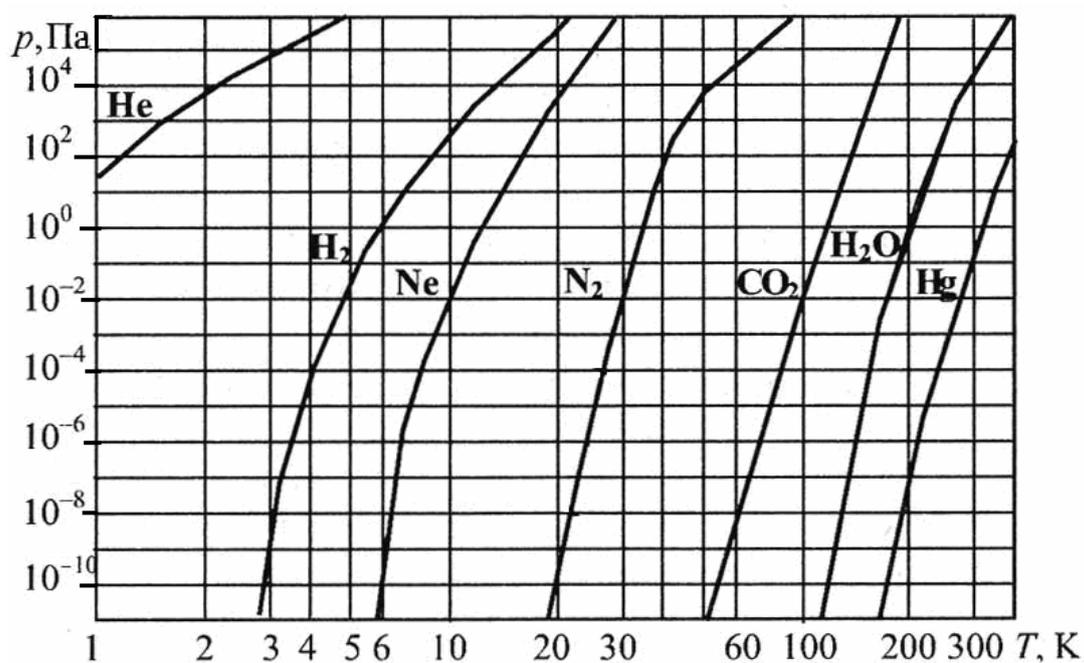
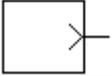
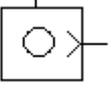
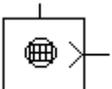
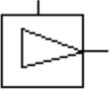
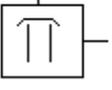


Рис. III Зависимость давления насыщенных паров некоторых газов от температуры поверхности криопанели

Таблица 10

Условные обозначения элементов вакуумных систем [1]

Элементы вакуумной схемы	Обозначения	
	графическое	текстовое
Насос вакуумный (общее обозначение)		N
Насос вакуумный механический		
а) вращательный	а) 	NL
б) турбомолекулярный	б) 	NR
Насос вакуумный струйный		
а) эжекторный	а) 	NH
б) диффузионный	б) 	ND
Насос вакуумный сорбционный		
а) адсорбционный	а) 	NA
б) криосорбционный	б) 	NC
в) ионно-сорбционный	в) 	NE
г) магниторазрядный	г) 	NM
Ловушка (общее обозначение)		B
Вакуумметр (общее обозначение)		P
Клапан проходной		VR
Натекатель		VF
Камера вакуумная (общее обозначение)		CV
Трубопровод (общее обозначение)		T

Содержание

Введение	3
Часть I Техника получения и измерения вакуума	6
1. Теоретические основы вакуумной техники	6
1.1 Общие сведения	6
1.2 Основное уравнение вакуумной техники	7
1.3. Режимы течения газов по трубопроводам	9
1.4 Общая характеристика методов получения вакуума	10
2. Механические методы получения вакуума	12
2.1 Объемные вакуумные насосы с масляным уплотнением	12
2.2 Объемные безмасляные насосы	14
2.3 Молекулярные насосы	16
2.4 Паромасляные диффузионные насосы	18
3. Физико-химические методы получения вакуума	24
3.1 Электрофизические средства откачки	24
3.1.1 Принцип действия и классификация электрофизических средств откачки	24
3.1.2 Испарительные насосы	26
3.1.3 Ионно–сорбционные насосы	27
3.2 Низкотемпературные средства откачки	31
3.2.1 Принцип действия и классификация низкотемпературных средств откачки	31
3.2.2 Криоконденсационные насосы	33
3.2.3 Криoadсорбционные насосы	35
4 Вакуумные ловушки	38
5. Методы измерения вакуума	42
5.1 Общие сведения	42
5.2 Тепловые вакуумметры	43
5.3 Электронные ионизационные вакуумметры	45
5.4 Магнитные электроразрядные вакуумметры	47
6. Вакуумные системы и их элементы	48
6.1 Типовые вакуумные системы	48
6.2 Конструкционные элементы вакуумных систем	51
6.2.1 Разборные вакуумные соединения	51
6.2.2 Вакуумные трубопроводы	54
6.2.3 Устройства для передачи движения в вакуум	55
6.2.4 Запорно-регулирующая аппаратура	57
6.3 Конструкционные вакуумные материалы	58
Часть II Расчет вакуумных систем	63
7. Проектный расчет	63

8. Поверочный расчет	67
8.1 Расчет суммарного потока газов.....	67
8.2 Расчет проводимости высоковакуумной системы	72
8.3 Расчет эффективной быстроты откачки и давления в рабочей камере.	79
8.4 Расчет времени предварительной откачки	81
Часть 3 Методические указания по самостоятельной работе студентов	87
Примеры решения задач	87
Задания для аудиторных практических занятий	91
Индивидуальные задания	101
Список литературы	104
Приложение	105

Учебное издание

Юрьева Алёна Викторовна

Расчёт вакуумных систем

Учебное пособие

Научный редактор
*доктор физико-математических наук,
профессор В.П.Кривобоков*

Компьютерная верстка *И.О. Фамилия*
Дизайн обложки *И.О. Фамилия*

Подписано к печати 05.11.2012. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.
Заказ . Тираж 35 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru

