

Б. С. ДАНИЛИН

В А К У У М
И ЕГО
ПРИМЕНЕНИЕ

ВСЕСОЮЗНОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТРУДРЕЗЕРВИЗДАТ
МОСКВА 1958

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Брошюра дает некоторые элементарные представления о вакууме и важнейших свойствах высокоразреженного газа, знакомит читателя с техникой получения и измерения вакуума, с устройством вакуумных систем и использованием вакуума в различных областях науки, техники и промышленного производства.

Брошюра рассчитана на преподавателей и мастеров учебных заведений трудовых резервов. Может быть полезна также инженерно-техническим работникам, которым по роду своей работы приходится иметь дело с различного рода вакуумной аппаратурой.

Со всеми замечаниями по брошюре просим обращаться по адресу: Москва, Центр, Хохловский пер. д. 7, Трудрезервиздат.

ВВЕДЕНИЕ

Вакуумная техника — одна из наиболее молодых областей техники, особенно сильно выросшая за послевоенные годы и проникшая из лабораторий в самые различные области промышленного производства.

Широкое применение вакуумной техники в народном хозяйстве неразрывно связано с успехами в области получения и измерения вакуума, конструирования и изготовления вакуумных систем, разработки новых разнообразных вакуумтехнических приборов и т. п.

До сравнительно недавнего времени вакуумные установки в виде откачных постов и автоматов использовались в основном в электровакуумной промышленности для откачки различных приборов, приемно-усилительных и генераторных ламп, электронно-лучевых и рентгеновских трубок, фотоэлементов и фотумножителей, а также различного рода газоразрядных приборов. В послевоенные годы вакуум нашел широкое применение также в металлургической, химической, фармацевтической, пищевой промышленности, в установках для исследования газодинамики разреженных сред и ядерных процессов.

На смену хрупким в работе стеклянным вакуумным установкам пришли цельнометаллические вакуумные системы, обладающие высокой прочностью, надежные и удобные в эксплуатации.

Конструкции вакуумных установок, выбор откачных средств и приборов для измерения вакуума существенно зависят от назначения установки. Так, например, вакуумная сушка пищевых продуктов проводится при сравнительно небольшом разрежении (порядка нескольких миллиметров ртутного столба); при этом из высушиваемых продуктов выделяется большое количество паров воды. Поэтому в сушильных установках применяются механические вакуумные насосы, пригодные для откачки паров воды. Вакуумная плавка металлов проводится при давлениях 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст. и сопровождается интенсивным выделением газов из расплавленных металлов, вследствие чего в плавильных печах применяют вакуумные паромасляные насосы, имеющие большую быстроту действия в указанном диапазоне давлений. Высоковольтные установки для ядерных исследований требуют создания

в очень больших объемах давлений до 10^{-6} мм рт. ст и ниже. Для достижения такого разрежения применяют паромасляные насосы с колоссальными скоростями откачки, достигающими нескольких десятков тысяч литров в секунду.

В установках, предназначенных для масс-спектрометрического анализа газов, работающих при давлении около 10^{-7} мм рт. ст, предъявляются высокие требования к герметичности и чистоте системы. В этих установках применяют обычно специальные конструкции вакуумных уплотнений и предусматривают прогресс системы под вакуумом для обезгаживания.

Особенно высокие требования к вакууму предъявляются в установках, предназначенных для изучения явлений, происходящих на поверхности твердых тел. Для того чтобы длительное время сохранить изучаемую поверхность практически свободной от молекул газа, нужно, чтобы давление в вакуумной установке не превышало 10^{-10} мм рт. ст. Способы получения и измерения столь низких давлений требуют оборудования и специальных приемов, которые отличаются от обычно используемых способов получения и измерения давлений до 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст.

С развитием вакуумной техники и расширением областей применения ее в народном хозяйстве все больший интерес проявляется к вакуумной технической литературе со стороны широкого круга людей различных специальностей.

Целью настоящей брошюры является ознакомление читателя с понятием о вакууме и важнейшими свойствами высоко Разреженного газа, техникой получения и измерения вакуума, устройством вакуумных систем и использованием вакуума в различных областях науки, техники и промышленного производства.

1. ПОНЯТИЕ О ВАКУУМЕ И ВАЖНЕЙШИЕ СВОЙСТВА РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

Слово «вакуум» в переводе с латинского языка означает пустоту. В современной науке и технике вакуумом принято называть разреженное состояние газа при давлениях ниже атмосферного.

Если при атмосферном давлении газ представляет собой совокупность молекул, находящихся в хаотическом тепловом движении, в результате которого молекулы испытывают большое число столкновений между собой и со стенками сосуда, то в сильно разреженном газе хотя и сохраняется хаотический характер движения молекул, однако взаимодействие между ними практически исчезает и они прямолинейно двигаются в пределах предоставленного им объема, сталкиваясь в основном со стенками сосуда. Чем меньше число молекул в единице объема, тем реже происходят взаимные столкновения молекул и тем больше средний путь, проходимый молекулами между двумя соударениями.

Среднее расстояние, которое проходит молекула между двумя соударениями с другими молекулами, называется средней длиной свободного пробега и выражается обычно в сантиметрах. При неизменной температуре средняя длина свободного пробега молекул λ обратно пропорциональна давлению газа p , которое в вакуумной технике чаще всего измеряют в мм (миллиметрах) и мк (микронах) ртутного столба ($1 \text{ ат} = 760 \text{ мм рт. ст.}$, $1 \text{ мм рт. ст.} = 1000 \text{ мк рт. ст.}$).

В табл. 1 приведены для воздуха число молекул в 1 см^3 и средние длины их свободного пробега при различных давлениях и температуре 20° .

Табл. 1 показывает относительность распространенного представления о вакууме, как о безвоздушном пространстве, поскольку даже при давлении 10^{-7} мм рт. ст., которое может быть получено только при применении наиболее совершенных конструкций современных высоковакуумных насосов, в каждом кубическом сантиметре еще остается более трех миллиардов молекул газа.

Важнейшие свойства газа (его теплопроводность, вязкость, характер движения по трубопроводу в процессе откачки и т. п.)

Т а б л и ц а 1

Давление, мм рт. ст	Число молекул в 1 см ³	Средняя длина свободного пробега, см
760	$2,5 \cdot 10^{19}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$
1	$3,3 \cdot 10^{16}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{15}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{14}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$
$1 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{13}$	4,7
$1 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{12}$	$4,7 \cdot 10^1$
$1 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{11}$	$4,7 \cdot 10^3$
$1 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{10}$	$4,7 \cdot 10^5$
$1 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^9$	$4,7 \cdot 10^4$
$1 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^8$	$4,7 \cdot 10^6$
$1 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^7$	$4,7 \cdot 10^8$

и явления, происходящие в среде разреженного газа (диффузия, испарение и т. п.), изменяются в зависимости от того, преобладают ли при тепловом движении молекул удары их о стенки или взаимные столкновения друг с другом. Показателем этого является соотношение между средней длиной свободного пробега λ и характерным линейным размером d того сосуда, в котором находится газ.

Состояние газа, при котором $\lambda > d$, называют высоким вакуумом, при котором $\lambda < d$, называют низким вакуумом. Промежуточное состояние газа, когда $\lambda \approx d$, т. е. когда λ не очень резко отличается от d в ту или иную сторону, иногда называют средним вакуумом.

Рассмотрим диффузию, испарение, теплопроводность, вязкость газа и характер его движения по трубопроводу в процессе откачки при различных соотношениях между λ и d .

Диффузия. Представим себе замкнутый объем, разделенный на две части непроницаемой перегородкой. Пусть в обеих частях этого объема при одном и том же давлении находятся два различных газа. Если перегородку убрать, то вследствие теплового движения молекул оба газа будут проникать (диффундировать) друг в друга, так что в конце концов образуется смесь газов с одинаковой концентрацией молекул обоих газов во всем объеме.

Так как путь, проходимый молекулой при тепловом движении, складывается из очень большого числа отрезков, пробегаемых ею между соударениями с другими молекулами, то скорость диффузии зависит от числа столкновений между молекулами. Поэтому в условиях низкого вакуума скорость диффузии зависит от давления газа и скорости молекул. Чем выше давление (или плотность газа) и чем ниже скорость молекул (или температура газа), тем меньше скорость диффузии.

При больших давлениях и низких температурах скорость диффузии газа мала. С уменьшением давления газа скорость

диффузии непрерывно растет до тех пор, пока длина свободного пробега не станет сравнимой с размерами системы. При высоком вакууме, когда $\lambda > d$, столкновения между молекулами практически исчезают и скорость диффузии перестает зависеть от давления газа. В этом случае скорость диффузии определяется только тепловой скоростью молекул.

В вакуумной технике принцип диффузии использован в устройстве вакуумных пароструйных насосов, откачивающее действие которых основано на диффузии газа в струю пара рабочей жидкости, непрерывно истекающую из сопла.

Испарение. Если в сосуд поместить какой-либо металл и нагревать его до высокой температуры, то металл будет испаряться. Атомы металла, покидая его поверхность, вследствие теплового движения будут диффундировать к стенкам сосуда и конденсироваться на них.

При этом в случае низкого вакуума в сосуде атомы испаряющегося металла, испытывая столкновения с молекулами газа в сосуде и отражаясь от них, частично снова возвращаются на поверхность металла, вследствие чего скорость испарения металла оказывается небольшой. Кроме того, столкновения атомов металла с молекулами газа изменяют их начальную ориентировку, вследствие чего невозможно создать направленный поток испаряющихся частиц.

При наличии высокого вакуума возврат испаренных атомов из-за отсутствия столкновений с молекулами газа практически отсутствует и скорость испарения имеет максимальную для данной температуры величину. Испаряющиеся частицы, уходя с поверхности металла, сохраняют прямолинейное движение вплоть до удара о стенку сосуда. Если между источником пара и стенкой сосуда поместить экран, то на стенке образуется молекулярная тень (в виде резко очерченного участка, не покрытого частицами испаряющегося вещества), воспроизводящая изображение экрана, а на самом экране налет от сконденсировавшегося пара получается только на той стороне экрана, которая обращена к источнику пара.

Метод испарения в высоком вакууме широко используется для покрытия поверхностей металлическими и неметаллическими пленками (алюминирование, серебрение, нанесение зеркальных пленок на отражатели в осветительных приборах, получение пленки газопоглотителя в баллоне электровакуумного прибора).

Теплопроводность. В разреженном газе передача тепла от нагретого тела холодному происходит за счет того, что молекулы газа, находящиеся вблизи нагретого тела, приобретают при столкновении с ним более высокую кинетическую энергию и переносят ее холодному телу. При этом в зависимости от соотношения между λ и d передача тепла осуществляется либо путем ряда последовательных столкновений молекул между собой, при каждом из которых избыток кинетической энергии передается

следующей молекуле до тех пор, пока не будет достигнут контакт с поверхностью холодного тела, либо путем непосредственных соударений молекул, обладающих избытком кинетической энергии, с самой поверхностью холодного тела.

В условиях низкого вакуума, когда молекулы испытывают большое число столкновений между собой, количество переносимого тепла пропорционально числу переносчиков тепла (соответственно давлению газа или плотности) и разности энергий молекулы в начальной и конечной точках длины свободного пробега. Если уменьшать давление газа, но так, чтобы сохранилось условие $\lambda < d$, то число переносчиков тепла будет соответственно уменьшаться, но одновременно будет возрастать разность энергий молекулы в начальной и конечной точках длины свободного пробега, так как длина свободного пробега молекул возрастает. При этом суммарное количество тепла, переносимое молекулами, будет оставаться неизменным. Следовательно, теплопроводность газа в условиях низкого вакуума не зависит от давления.

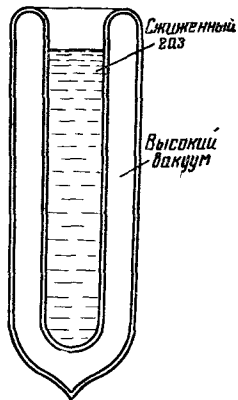


Рис. 1. Устройство сосуда Дьюара для хранения сжиженных газов

Если понизить давление газа так, что длина свободного пробега молекул станет равной и больше расстояния между горячим и холодным телами, то перенос энергии от нагретого тела холодному будет осуществляться молекулами непосредственно без столкновений друг с другом. При этом уменьшение давления газа будет приводить к уменьшению числа переносчиков тепла, разность же энергий молекулы в начале и конце длины свободного пробега будет оставаться неизменной. Поэтому в условиях высокого вакуума теплопроводность газа прямопропорциональна давлению.

Малая теплопроводность газа в условиях высокого вакуума положена в основу устройства сосудов Дьюара (рис. 1). Эти сосуды имеют двойные стенки, в пространстве между которыми создан высокий вакуум. Вследствие очень малой теплопроводности высоко Разреженного газа в этих сосудах длительное время могут храниться сжиженные газы.

На зависимости теплопроводности газа от давления основана работа теплоэлектрических манометров, измеряющих давление разреженного газа в диапазоне от нескольких миллиметров до тысячных долей миллиметра ртутного столба.

Вязкость газа или внутреннее трение. Если в газе помещены две пластины, одна из которых неподвижна, а другая перемещается с некоторой скоростью, то молекулы газа, попадая в процессе теплового движения на подвижную пластину и получая от нее импульсы в направлении движения, будут передавать свои

импульсы другим молекулам при взаимных столкновениях, и в конце концов в процессе такого обмена импульсами неподвижная пластина также начнет перемещаться в направлении движения подвижной пластины.

Если длина свободного пробега молекул газа очень мала по сравнению с расстоянием между пластинами, то движение газа можно рассматривать как перемещение отдельных слоев газа; при этом слои газа, примыкающие к подвижной пластине, имеют наибольшую скорость, а слои газа, примыкающие к неподвижной пластине, наименьшую скорость (скорость убывает от слоя к слою). Явление такого переноса импульсов молекулами газа называется вязкостью газа, или внутренним трением.

Явление вязкости по своему характеру сходно с явлением теплопроводности. Разница заключается лишь в том, что в случае теплопроводности переносимой молекулами величиной является энергия, а в случае вязкости — количество движения.

Подобно теплопроводности вязкость при низком вакууме не зависит от давления.

В условиях высокого вакуума, когда исчезают межмолекулярные столкновения, отсутствует увлечение одного слоя газа другим, и количество движения газа передается непосредственно стенкам сосуда, в котором он находится. Понятие внутреннего трения газа здесь уже теряет смысл, и потому в этой области давлений говорят о молекулярной вязкости газа. Молекулярная вязкость газа (которую можно отождествить с внешним трением газа о стенки трубопровода) в условиях высокого вакуума имеет свойства, полностью совпадающие со свойствами теплопроводности, т. е. она пропорциональна давлению и зависит от состояния поверхности.

Величина молекулярной вязкости газа имеет большое значение для определения характера течения газа по трубопроводу в процессе его откачки и для расчета сопротивления трубопроводов откачке.

Течение газа по трубопроводу. В зависимости от степени разрежения течение газа по трубопроводу носит различный характер.

В том случае, когда давление и количество протекающего через трубопровод газа относительно велики, имеет место турбулентный режим течения газа через трубопровод, характеризующийся неупорядоченным вихревым перемещением массы газа.

По мере уменьшения давления и количества протекающего через трубопровод газа режим течения газа изменяется, исчезают вихревые перемещения частичек газа, поток приобретает характер упорядоченного течения слоев газа. При этом скорость потока увеличивается от нуля вблизи стенок трубопровода, где прилегающие слои тормозятся вследствие трения о стенки, до максимальной в центре трубопровода. Такой режим течения газа называется вязкостным.

Перечисленные режимы относятся к условиям низкого вакуума. Движение газа приобретает совсем другой характер в условиях высокого вакуума. Здесь имеет место молекулярный режим течения газа, при котором молекулы газа перемещаются по трубопроводу независимо друг от друга, практически не испытывая столкновений между собой, а соударяясь только со стенками трубопровода.

Режимы течения газа по трубопроводу играют важную роль в вакуумной технике, так как сопротивление, создаваемое трубопроводом, зависит от того, какой режим течения газа имеет место в процессе откачки.

II. ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА

1. Современные способы получения вакуума

При использовании вакуумной аппаратуры в промышленных условиях приходится иметь дело с очень широким диапазоном давлений (от атмосферного до 10^{-7} мм рт. ст.) В лабораторной практике подчас бывает необходимо получать еще более низкие давления (вплоть до 10^{-11} мм рт. ст.). Вполне понятно, что такой широкий диапазон не позволяет осуществлять получение вакуума с помощью какого-либо одного способа. Поэтому для получения вакуума используются различного рода вакуумные насосы и специальные газопоглотители.

Из вакуумных насосов наибольшее распространение имеют вращательные масляные насосы, создающие разрежение около 10^{-3} мм рт. ст. и пароструйные насосы, с помощью которых может быть получено разрежение до 10^{-7} мм рт. ст. Еще более низкие давления (до 10^{-8} — 10^{-9} мм рт. ст.) могут быть получены при использовании ионных и ионно-испарительных насосов.

Самые низкие давления (вплоть до 10^{-11} мм рт. ст.) получают путем использования свойства некоторых манометров (ионизационных с горячим катодом и магнитно-электроразрядных с холодным катодом) поглощать при своей работе остаточные газы. Однако, если ограничиться только удалением воздуха из какого-либо прибора, то после его отсоединения от вакуумной системы в приборе будет наблюдаться довольно быстрое повышение давления. Причиной этого является выделение газов со стенок и из внутренних деталей прибора.

Значительное уменьшение газовыделения из большинства материалов может быть достигнуто благодаря их предварительному обезгаживанию путем прогрева до высоких температур в условиях непрерывной откачки.

Большинство электровакуумных приборов после их предварительного обезгаживания с одновременной откачкой отпаиваются от вакуумной установки и в таком виде поступают в эксплуатацию.

Тем не менее, если не принять соответствующих мер, то в процессе работы прибора не исключена возможность повторного газовыделения из тех или иных деталей, в результате чего при-

бор может выйти из строя. Для того чтобы непрерывно поддерживать высокий вакуум внутри отпаянных приборов, применяют газопоглотители, использующие свойства некоторых твердых тел (бария, магния, фосфора и др.) поглощать и удерживать на своей поверхности газы, выделяющиеся в процессе эксплуатации этих приборов. С помощью газопоглотителей в вакуумной лампе накаливания непрерывно поддерживается давление 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст., в электронной лампе 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст., а в некоторых специальных типах электровакуумных приборов еще более низкое давление.

2. Вакуумные насосы

Любой вакуумный насос характеризуется следующими основными параметрами: предельным вакуумом, быстротой действия, производительностью и наибольшим выпускным давлением.

Предельным вакуумом называется наименьшее остаточное давление, которое может быть создано насосом в герметичной (вакуумно-плотной) и хорошо обезгаженной вакуумной системе.

Быстротой действия насоса называется объем газа, удаляемый насосом в единицу времени при данном впускном давлении. Быстрота действия измеряется в $см^3/сек$, $л/сек$, $м^3/мин$.

Производительностью насоса называется количество газа, удаляемого насосом в единицу времени при данном впускном давлении. Она измеряется в $г/сек$, $л \cdot мк/сек$, $л \cdot мм/сек$, $см^3 \cdot ат/час$.

Наибольшим выпускным давлением называется наибольшее значение давления в выпускном патрубке насоса, превышение которого приводит к ухудшению характеристик насоса (предельного вакуума и быстроты действия).

Вращательные масляные насосы Из различных типов вращательных вакуумных насосов наиболее широкое распространение в вакуумной технике получили вращательные масляные насосы.

Эти насосы работают с выхлопом в атмосферу и служат для откачки газов из вакуумных систем от атмосферного давления до давлений порядка 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст.

Промышленностью выпускаются насосы с быстротой действия от 0,2 до 150 $л/сек$.

Существуют три типа вращательных масляных насосов: пластинчато-роторные, пластинчато-статорные и золотниковые

Устройство пластинчато-роторного насоса представлено на рис. 2. Камера 1 насоса помещена в бак 2. Насос имеет впускной патрубок 3, соединенный с откачным пространством 4. В этом пространстве вращается поршень насоса, состоящий из барабана 5 (ротора) и двух пластин 6, расположенных в его прорезях. Между этими двумя пластинами находятся стальные пружинки, обеспечивающие плотное прилегание пластин к цилиндрической стенке камеры насоса. Ось вращения барабана совпадает с его геометрической осью, но смещена вверх относительно центра ка-

меры таким образом, чтобы барабан при своем вращении постоянно соприкасался со стенкой камеры насоса. При работе насоса пластины перемещаются вдоль прорезей в барабане, разграничивая область всасывания газа от области, где происходит его сжатие.

В процессе перемещения барабана в направлении, указанном стрелкой, объем, соединенный с впускным патрубком насоса, увеличивается и газ из вакуумной системы засасывается в этот объем. При дальнейшем перемещении барабана пластины, расположенные в его прорезях, отсоединяют этот объем от впускного патрубка 3, после чего объем уменьшается, газ в нем сжимается, открывает выпускной клапан 7 и через выпускной патрубок 8 выбрасывается за пределы насоса. Для создания надежного уплотнения в местах соприкосновения подвижных и неподвижных деталей насоса весь насос погружается в бак, заполненный вакуумным маслом. При этом смазка подвижных деталей обеспечивается за счет непрерывного поступления к ним масла через выпускной клапан, сальники и специально проточенные для этой цели каналы. Выпускной клапан насоса расположен ниже уровня масла в баке; слой масла над клапаном обеспечивает дополнительное уплотнение клапана и затрудняет обратное проникновение атмосферного воздуха внутрь насоса.

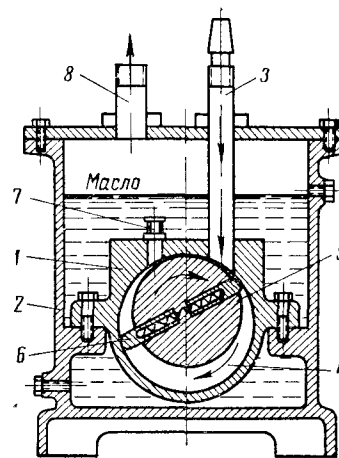


Рис. 2. Устройство одноступенчатого пластинчатого роторного насоса

1 — камера, 2 — бак, 3 — впускной патрубок, 4 — откачное пространство, 5 — барабан, 6 — пластина, 7 — выпускной клапан (шарик с пружиной) 8 — выпускной патрубок

Поочередная работа пластин при вращении поршня обеспечивает непрерывное всасывание и выбрасывание газа, а следовательно, откачку вакуумной системы, к которой насос присоединяется своим впускным патрубком.

Описанный насос является одноступенным. Для получения лучших значений предельного вакуума используют специальные двухступенные насосы, имеющие один впускной патрубок и один выпускной патрубок, но состоящие из двух секций, последовательное соединение которых выполнено под уровнем масла в баке, в котором помещены обе секции. При этом благодаря последовательному соединению двух ступеней первая ступень работает при сравнительно малом выпускном давлении, вследствие чего существенно уменьшается переток газа через неплотности из камеры сжатия в камеру всасывания первой ступени.

Пластинчато-роторные насосы применяются главным образом

в электровакуумной промышленности в виде многократных насосов, представляющих собой группу (до 12 шт.) отдельных насосов (одно- или двухступенных), смонтированных в общем масляном баке. Такого рода многократные насосы широко применяются в автоматах откачки приемно-усилительных и осветительных ламп.

На рис. 3 представлен схематический чертеж пластинчато-статорного насоса. Ротор 2, эксцентрично насаженный на вал 1, вращается вокруг оси, совпадающей с геометрической осью камеры (для смещения центра тяжести к оси вращения в роторе высверливаются соответствующие полости). Одной из своих образующих ротор при вращении все время скользит по цилиндру камеры. Разделение впускной и выпускной сторон осуществляется уплотнительной пластиной 4, перемещающейся в прорези статора 3. Пластина 4 под давлением рычага 7, натянутого пружиной 8, плотно прилегает к поверхности ротора. Процесс всасывания и выбрасывания газа насосом заключается таким образом в изменении соответствующих объемов рабочей камеры.

Чаще всего пластинчато-статорные насосы делаются двухступенными. При этом оба ротора вращаются на одном валу и расположены таким образом, что, когда в первой ступени происходит всасывание, то во второй — выхлоп.

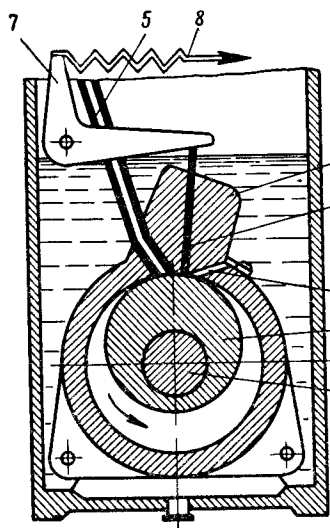


Рис. 3 Устройство одноступенного пластинчато-статорного насоса

1 — вал, 2 — ротор, 3 — статор, 4 — пластина, 5 — впускной патрубок, 6 — выпускной патрубок, 7 — рычаг, 8 — пружина

Устройство золотникового (плунжерного) насоса показано на рис. 4. На эксцентрично сидящий на валу ротор 1 надета цилиндрическая обойма (плунжер) 2, от которой отходит открытая сверху полая направляющая 3 с отверстием 4. При вращении ротора обойма катится с очень малым зазором по стенке камеры, направляющая совершает колебательное движение, скользя вверх и вниз в золотнике. Откачиваемый газ засасывается в рабочую камеру через верхнее отверстие направляющей и выбрасывается через выпускной патрубок с клапаном 5. Путь газа при откачке показан на рис. 4 стрелками.

Благодаря небольшому трению между подвижными частями в насосах такого типа нет необходимости погружать весь корпус насоса в бак с маслом. Поэтому в крупных насосах иногда применяется принудительная циркуляция масла. Масло в виде весьма мелких брызг вместе с откачиваемым воздухом попадает из вы-

пускного патрубка в так называемый сепаратор, откуда по мере накопления в охлажденном виде поступает обратно в насос.

Стенки корпуса у крупных насосов золотникового типа имеют водяные рубашки для охлаждения проточной водой. Золотниковые насосы самые высокопроизводительные из всех типов вращательных масляных насосов, быстрота действия у них достигает сотен литров в секунду.

Вращательные масляные насосы находят широкое применение для обеспечения требуемой степени вакуума в целом ряде технологических процессов, при которых выделяется большое количество конденсирующихся паров (вакуумная сушка, дистилляция, пропитка под вакуумом и т. д.). Однако вращательные масляные насосы обычной конструкции не приспособлены для откачки водяных или других конденсирующихся паров и парогазовых смесей. Для пояснения этого рассмотрим процесс откачки объема, в котором содержится большое количество водяного пара, с помощью обычного вращательного масляного насоса пластинчато-роторного типа.

В положении I (рис. 5, а) рабочая камера насоса сообщается с разрежаемым объемом I. При этом парогазовая смесь засасывается в рабочую камеру насоса.

В положении II закончен цикл всасывания, рабочая камера насоса отсечена пластиной 3 от откачиваемого объема. Начинается цикл сжатия парогазовой смеси в насосе. Сжатие продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто полное давление смеси, несколько большее атмосферного, необходимое для открытия выпускного клапана 5. При этом возрастает соответственно и парциальное давление водяного пара в смеси. Как только оно достигнет значения, равного давлению насыщения при температуре камеры сжатия насоса (при комнатной температуре давление насыщения водяного пара равно 17 мм рт. ст.), начинается конденсация водяного пара. Дальнейшее сжатие уже не приводит к повышению парциального давления пара, лишь возрастает количество образующегося конденсата.

В положении III цикл сжатия закончен, открывается выпуск-

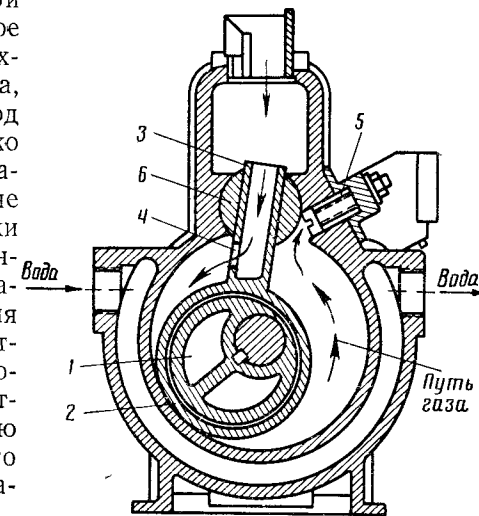


Рис. 4 Устройство золотникового (плунжерного) насоса.

1 — ротор, 2 — цилиндрическая обойма, 3 — направляющая, 4 — отверстие, 5 — выпускной патрубок с клапаном, 6 — золотник

ной клапан и начинается выпуск влажного газа; вода остается в рабочей камере насоса.

Многочисленное повторение процесса сжатия приводит к обогащению насосного масла водой. Смешиваясь с маслом, вода образует с ним эмульсию, которая, попадая с циркулирующим в насосе маслом в камеру всасывания, испаряется, снова выделяя водяной пар в откачиваемый объем.

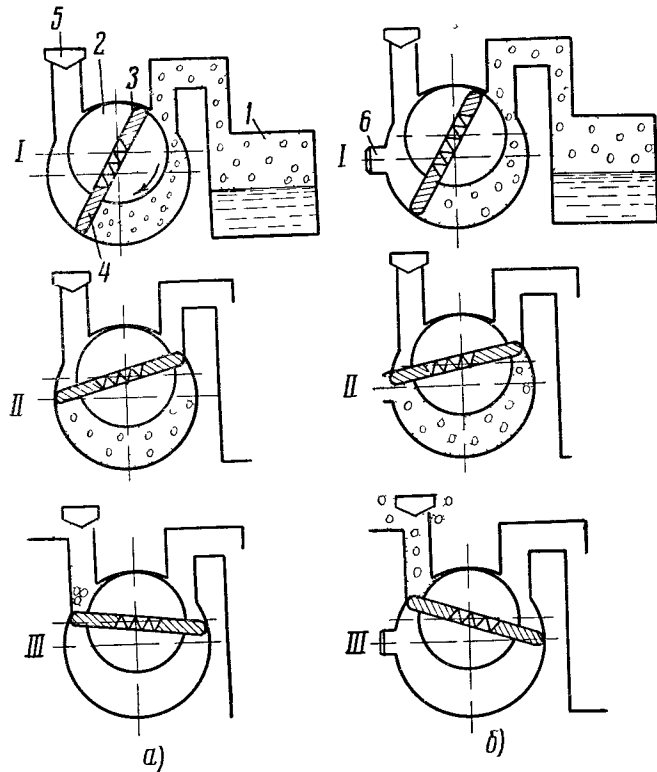


Рис. 5. Схема работы вращательного масляного насоса пластинчато-роторного типа:

a — без напуска балластного газа, *б* — с напуском балластного газа, *1* — откачиваемый объем, *2* — ротор, *3* и *4* — пластины, *5* — выпускной клапан, *6* — отверстие для напуска балластного газа
Условные обозначения: точки — воздух, кружочки — пары воды

Такова основная причина непригодности обычных вращательных насосов для эффективной откачки конденсирующихся паров.

Попадание воды в насосное масло крайне нежелательно также ввиду того, что в результате взаимодействия воды с окислами металлов, постоянно присутствующими в насосе за счет непрерывных процессов окисления его трущихся частей, образуются гидраты окислов. Эти гидраты, в свою очередь, взаимодействуют

с растворенными в масле органическими кислотами, образуют мыла, являющиеся катализаторами процессов окисления и осмоления масла. Масло становится более густым и менее пригодным для использования в качестве уплотнителя. Трущиеся поверхности насоса покрываются пленкой смолообразных продуктов окисления масла. Ротор насоса, работающего продолжительное время без промывки и замены масла, в результате осмоления начинает туго проворачиваться. В конечном итоге сильное осмоление может привести к поломке насоса или выходу из строя электродвигателя.

С целью предотвращения конденсации паров при их сжатии в процессе откачки вращательные насосы снабжаются специальными устройствами, с помощью которых в определенный момент времени в камеру сжатия насоса впускается атмосферный воздух. Такого рода усовершенствованные насосы, предназначенные для эффективной откачки паров и парогазовых смесей, носят название газобалластных насосов.

Рассмотрим процесс откачки объема, в котором содержится большое количество водяного пара с помощью вращательного насоса пластинчато-роторного типа, снабженного газобалластным устройством.

В положении *I* (рис. 5, б) происходит всасывание парогазовой смеси (аналогично положению *I* в обычном насосе, рис. 5, а).

В положении *II* в начале цикла сжатия открывается отверстие *б*, через которое в рабочую камеру насоса напускается атмосферный воздух (балластный газ). При этом парциальное давление газа в сжимаемой смеси возрастает, а парциальное давление пара соответственно уменьшается. Количество балластного газа выбирается таким, чтобы при достижении полного давления смеси в конце цикла сжатия, необходимого для открытия выпускного клапана, парциальное давление пара в смеси было меньше давления насыщения. В этом случае конденсации пара не происходит.

В положении *III* открывается выпускной клапан и пар в смеси с газом выбрасывается в атмосферу.

Газобалластными устройствами могут быть снабжены вращательные масляные насосы всех трех рассмотренных выше типов.

Высоковакуумные пароструйные насосы. Высоковакуумные пароструйные насосы предназначены для создания и поддержания в вакуумных системах низких давлений (10^{-4} — 10^{-7} мм рт. ст.). Откачивающее действие высоковакуумных пароструйных насосов основано на диффузии газа в паровую струю, непрерывно истекающую из сопла со сверхзвуковой скоростью. Так как скорость диффузии обратно пропорциональна плотности среды, то для получения возможно большей быстроты действия насоса плотность струи должна быть достаточно малой. Поэтому в высоковакуумном насосе паровая струя истекает в вакуум, создаваемый вращательным масляным насосом, устанавливаемым последова-

тельно с пароструйным. При этом перед запуском пароструйного насоса вакуумная система и объем самого пароструйного насоса предварительно откачиваются вращательным насосом до давления, меньшего величины наибольшего выпускного давления пароструйного насоса; затем запускается пароструйный насос. Наибольшее выпускное давление для большинства высоковакуумных пароструйных насосов составляет 100—200 мк рт. ст.

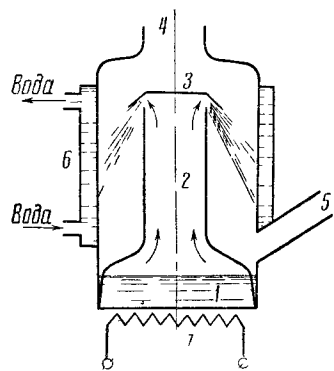


Рис. 6. Устройство одноступенчатого пароструйного насоса

1 — кипятильник, 2 — паропровод, 3 — зонтичное сопло, 4 — впускная трубка, 5 — выпускная трубка, 6 — рубашка водяного охлаждения, 7 — электронагреватель

На рис. 6 показана схема устройства одноступенчатого пароструйного насоса. Насос состоит из цилиндрического корпуса, имеющего впускную трубку 4, выпускную трубку 5, рубашку водяного охлаждения 6, из паропровода 2 с зонтичным соплом 3 и электронагревателя 7. В кипятильнике 1 насоса заливается рабочая жидкость (специальное вакуумное масло или ртуть). Образующиеся в результате нагрева в кипятильнике пары рабочей жидкости по паропроводу 2 устремляются к соплу 3 и истекают из него в виде расходящейся сверхзвуковой струи. Струя направлена под углом 60—80° к стенке насоса. Газ, поступающий из вакуумной системы через впускную трубку 4, диффундирует в струю пара и уносится ею к холодной стенке насоса.

Пар на стенке конденсируется и конденсат стекает по стенке в кипятильник, где снова испаряется, вследствие этого обеспечивается непрерывная циркуляция рабочей жидкости в насосе. Газ, попадая со струей на стенку, перетекает вдоль нее к выпускному патрубку 5 и уносится насосом предварительного разрежения (вращательным насосом).

Так как паровая струя истекает в вакуум и имеет малую плотность, то она выдерживает сравнительно небольшие перепады давления. Поэтому наибольшее выпускное давление одноступенчатого насоса мало. Однако малая плотность струи нужна лишь для обеспечения большой быстроты действия, а для получения высоких значений наибольшего выпускного давления, наоборот, струя должна иметь достаточно высокую плотность. Поэтому современные насосы выполняются многоступенными (чаще всего 2—3-ступенными). При этом ступени работают обычно последовательно в одном корпусе, питаясь паром из общего кипятильника. Первая со стороны впуска газа струя имеет малую плотность и большую скорость, остальные струи обладают значительно большей плотностью, увеличивающейся от ступени к ступени так, что последняя ближайшая к выпускному патрубку струя

обладает наибольшей плотностью. Многоступенные конструкции позволяют получать большую быстроту действия при высоком значении наибольшего выпускного давления.

Предельный вакуум, быстрота действия и другие параметры пароструйных насосов зависят как от их конструкции, так и от свойств рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости первоначально применялась ртуть. Достоинством ртути, как рабочей жидкости, является то, что она не портится при перегреве и кратковременном соприкосновении в горячем состоянии с атмосферным воздухом и не разлагается при длительной работе насоса. Поскольку ртуть является химическим элементом, то ее достоинством, как рабочей жидкости, является также определенная величина давления насыщенного пара и постоянная температура кипения.

Однако ртуть обладает рядом существенных недостатков. Во-первых, ртуть имеет высокое давление насыщенных паров при комнатной температуре, порядка 10^{-3} мм рт. ст. Поэтому, если не принимаются специальные меры, то с помощью ртутного насоса, являющегося неизбежным источником проникновения паров ртути в откачиваемую систему, нельзя получить предельный вакуум лучше 10^{-3} мм рт. ст. Это обстоятельство заставляет применять специальные охлаждаемые до низкой температуры ловушки между ртутным насосом и откачиваемой системой с тем, чтобы понизить давление насыщенных паров ртути. Так, при применении в качестве охлаждающего агента для ловушки жидкого азота ($t = -193^\circ$) давление насыщенного пара ртути составляет всего 10^{-23} мм рт. ст. Во-вторых, пары ртути, проникающие через насос предварительного разрежения в производственное помещение, даже в небольших количествах, вредны для здоровья человека.

По указанным причинам область применения парортутных насосов за последние годы значительно сократилась, и в настоящее время наиболее широкое распространение имеют паромасляные насосы, использующие в качестве рабочей жидкости очищенные нефтяные масла, сложные эфиры органических спиртов и кислот и кремнеорганические соединения. Путем фракционной перегонки исходных нефтяных продуктов удается получить масла, имеющие низкое давление насыщенного пара, благодаря чему отпадает необходимость, за редкими исключениями, в применении ловушек для вымораживания паров.

В отличие от ртути нефтяные масла не имеют однородного состава, а следовательно, и определенной точки кипения. Они представляют собой смеси узких фракций с различной температурой кипения. При продолжительной работе в насосе легкие фракции масла, обладающие большой упругостью насыщенных паров, могут уходить из насоса, например, за счет откачки насосом предварительного разрежения. По этой причине состав масла в кипятильнике меняется, что приводит к изменению и характе-

ристик насоса. Кроме того, нефтяное масло чувствительно к перегреву и не допускает соприкосновения в горячем состоянии с атмосферным воздухом, так как при этом происходит разложение масла (термический крекинг) и его окисление, в результате которых масло приходит в негодность.

От этих недостатков свободны силиконовые жидкости (эфиры фосфорной и кремниевой кислот), а также органополисиликоновые смеси. Они не чувствительны к перегреву и обеспечивают надежную работу насоса в том случае, если в процессе его эксплуатации в рабочий объем насоса попадает атмосферный воздух.

Наиболее совершенными конструкциями паромасляных насосов являются разгоночные насосы, которые отличаются тем, что в процессе их работы в них самих происходит разделение масла на фракции (разгонка). Типичным насосом разгоночного типа является изображенный на рис. 7 стеклянный двухступенный паромасляный насос с воздушным охлаждением.

Фракционирование в насосе осуществляется следующим образом: пары

масла, истекающие из обеих сопел, конденсируются на стенках насоса и конденсат по соединительной трубке 10 стекает в кипяtilьник 1, в котором в первую очередь испаряются легкие фракции масла, кипящие при наиболее низкой температуре, так что масло, перетекающее по трубке 11 в кипяtilьник 2, состоит в основном из тяжелых фракций. Таким образом, из сопла низковакуумной ступени истекают пары, обогащенные легкими фракциями масла, что обеспечивает получение высокого значения наибольшего выпускного давления насоса; из сопла высоковакуумной ступени истекают пары, обогащенные тяжелыми фракциями масла, что обеспечивает получение низкого остаточного давления в насосе (так как давление насыщенных паров тяжелых фракций очень мало).

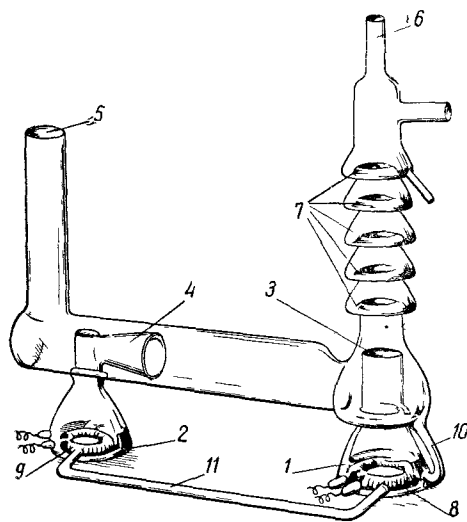


Рис. 7 Устройство стеклянного двухступенного паромасляного насоса разгоночного типа с воздушным охлаждением:

- 1 — кипяtilьник низковакуумного сопла,
- 2 — кипяtilьник высоковакуумного сопла,
- 3 — низковакуумное сопло, 4 — высоковакуумное сопло, 5 — впускной патрубок,
- 6 — выпускной патрубок, 7 — маслоприемники, 8 и 9 — электронагреватели, 10 и 11 — соединительные трубки

Кроме того, в насосе осуществляется дополнительное фракционирование масла за счет конденсации самых легких фракций пара, истекающего из низковакуумного сопла, на стенках выпускной патрубка, снабженного специальными маслоприемниками 7.

Описанная конструкция стеклянного насоса имеет быстроту действия несколько литров в секунду. Крупные разгоночные паромасляные насосы, быстрота действия которых доходит до нескольких тысяч литров в секунду, изготавливаются, как правило, из металла.

На рис. 8 изображен металлический двухступенный паромасляный насос разгоночного типа с быстротой действия около 100 л/сек. Насос имеет два сопла, причем для каждого сопла предусмотрен свой паропровод.

В высоковакуумное сопло 2 пары масла из кипяtilьника 1 подают по внутреннему паропроводу 3, в низковакуумное сопло 4 — по внешнему паропроводу 5, охватывающему внутренний. Оба паропровода установлены в кипяtilьнике 1 таким образом, что все заливаемое в насос масло распределяется по концентрическим камерам, соединенным системой отверстий, образующих своеобразный лабиринт, препятствующий быстрому перемешиванию отдельных частей масла в процессе работы насоса.

Пары масла, истекающие из обеих ступеней, конденсируются на охлаждаемых стенках насоса и конденсат стекает по стенке в кипяtilьник. Двигаясь от стенки к центру насоса, конденсат поступает сначала в камеру кипяtilьника, заключенную между внутренним 3 и внешним 5 паропроводами; здесь в первую очередь испаряются легкие фракции, поступающие к низковакуумному соплу 4; в центральную камеру поступает таким образом масло, состоящее в основном из тяжелых фракций, питающих паром высоковакуумное сопло 2.

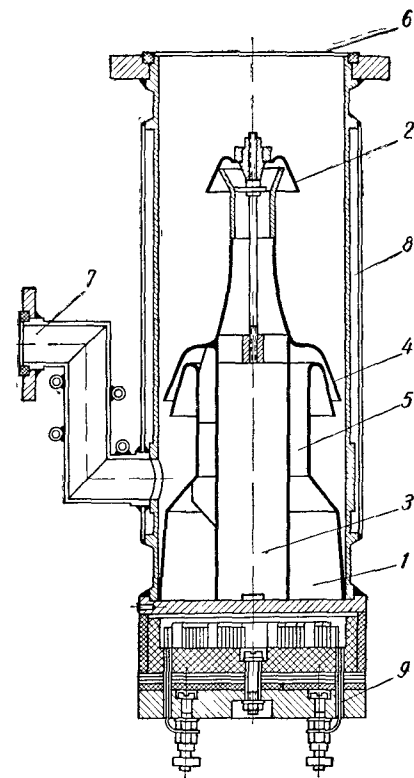


Рис. 8. Устройство металлического двухступенного паромасляного насоса разгоночного типа с водяным охлаждением:

- 1 — кипяtilьник, 2 — высоковакуумное сопло, 3 — внутренний паропровод, 4 — низковакуумное сопло, 5 — внешний паропровод, 6 — впускной патрубок, 7 — выпускной патрубок, 8 — рубашка водяного охлаждения, 9 — электронагреватель

Паромасляные насосы широко применяются в различных отраслях промышленности: в электровакуумной для откачки радиоламп, электронно-лучевых и телевизионных трубок, в металлургии для откачки вакуумных печей, в установках для нанесения покрытий, в дистилляционных установках и т. д. Промышленностью выпускаются паромасляные насосы с быстротой действия от 5 до 8000 л/сек

Вспомогательные (бустерные) насосы Почти все высоковакуумные насосы удовлетворительно работают при впускных давлениях, не превышающих 10^{-4} мм рт. ст., так как имеют паровые струи малой плотности. При более высоких впускных давлениях паровая струя разрушается и быстрота действия высоковакуумного насоса резко падает.

Вращательные масляные насосы наиболее эффективно работают в диапазоне давлений $760—10^{-1}$ мм рт. ст. При более низких давлениях ($10^{-2}—10^{-3}$ мм рт. ст.) быстрота действия вращательных насосов резко снижается, почти до нуля.

Таким образом, ни высоковакуумные, ни вращательные масляные насосы не могут удовлетворительно работать в области давлений $10^{-2}—10^{-4}$ мм рт. ст. Между тем имеется много отраслей промышленности, где требуются откачные средства, эффективно работающие именно в этой области давлений (плавка и обезгаживание под вакуумом, сушка, пропитка под вакуумом и т. д.).

Для этой цели чаще всего используются вспомогательные (бустерные) насосы. В паромасляных бустерных насосах, которые по внешнему виду почти не отличаются от высоковакуумных, несколько видоизменены сопла и повышено давление пара в кипятильнике за счет использования легко кипящего сорта масла, а также подведения более высокой мощности к кипятильнику.

В отличие от высоковакуумных насосов, где откачивающее действие обусловлено диффузией откачиваемого газа в струю пара, в бустерных насосах решающую роль играет явление вязкостного захвата откачиваемого газа струей пара, которая в этом случае имеет значительно большую плотность. Такого рода паромасляный насос может быть использован непосредственно для откачки системы со значительным газовыделением или же совместно с высоковакуумным насосом, обладающим большой быстротой действия, будучи включен между ним и насосом предварительного разрежения.

Паромасляные бустерные насосы, обладая рядом положительных качеств, имеют вместе с тем и существенные недостатки. Так, увеличение давления в откачиваемом объеме выше нескольких миллиметров ртутного столба приводит к срыву работы насоса. Попадание в работающий насос атмосферного воздуха приводит к порче рабочей жидкости.

От этих недостатков свободны механические бустерные насосы. Механический бустерный насос представляет собой уста-

новку, в которой последовательно соединены один или два бесшмазочных двухроторных насоса и вращательный масляный насос, снабженный газобалластным устройством.

Устройство бесшмазочного двухроторного насоса показано на рис. 9. В рабочей камере этого насоса в направлении, указанном стрелками, вращаются два ротора — лопасти. Форма и синхронное вращение этих лопастей подобраны таким образом, чтобы между самими лопастями, а также между лопастями и стенками рабочей камеры, сохранялся небольшой зазор ($0,1—0,2$ мм), не уплотняемый маслом. Отсутствие трения между движущимися деталями позволяет создать большую скорость вращения лопастей (до 3000 об/мин).

Действие двухроторного насоса основано на чисто механическом перекачивании определенного объема газа. При этом рабочими являются оба ротора, образующие со стенками корпуса насоса две параллельно работающие камеры.

Наибольшее выпускное давление двухроторной ступени составляет $10—20$ мм рт. ст. Существенной особенностью этих ступеней является постоянство степени сжатия ($10—15$ для одной ступени). Поэтому величина давления, создаваемого этими насосами в откачиваемой системе, зависит от величины давления на выпускном патрубке, создаваемого насосом предварительного разрежения.

Современные двухроторные насосы имеют быстроту действия до 5000 л/сек в области давлений $10^{-1}—10^{-3}$ мм рт. ст.

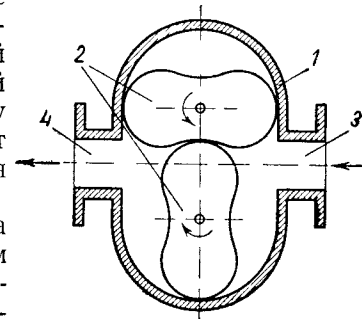


Рис. 9. Устройство бесшмазочного двухроторного насоса: 1 — корпус, 2 — роторы, 3 — впускной патрубок, 4 — выпускной патрубок

3. Физико-химические способы получения вакуума

Вакуумные насосы, обладая большой быстротой действия при откачке газов, часто оказываются недостаточно эффективными при откачке паров. Кроме того, они сами являются источниками паров рабочих жидкостей, попадающих в откачиваемую систему. Поэтому в вакуумной технике широко применяется вспомогательный способ получения высокого вакуума за счет интенсивной конденсации (вымораживания) присутствующих в вакуумной системе паров при помощи ловушек, стенки которых охлаждаются жидким азотом ($t = -193^\circ$), жидким воздухом ($t = -183^\circ$) или холодильной смесью с твердой углекислотой ($t = -80^\circ$).

Из стеклянных охлаждаемых ловушек наибольшее распространение получили ловушки четырех типов, изображенные на рис. 10. Первая из этих ловушек (рис. 10, а) в процессе эксплуатации

погружается в находящийся в сосуде Дьюара жидкий воздух или жидкий азот. У остальных ловушек жидкий азот заливается непосредственно во внутреннюю полость.

В ловушке, изображенной на рис. 10, в, имеется дополнительный цилиндр, который, удлиняя путь прохождения газа, обеспечивает лучшую конденсацию паров.

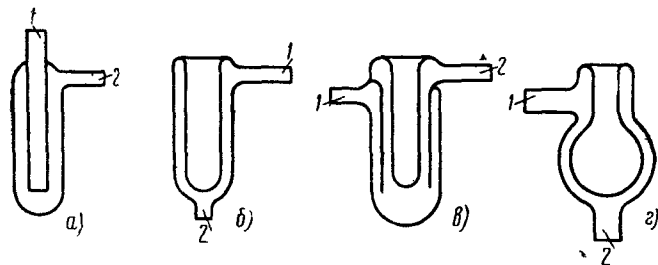


Рис. 10. Стекланные охлаждаемые ловушки коаксиального типа:

а — применяется с сосудом Дьюара, б — с внутренней полостью для заливки охлаждающего вещества, в — с дополнительным цилиндром, г — шаровая. Трубки: 1 — для присоединения к трубопроводу откачиваемого объекта, 2 — для присоединения к пароструйному насосу или к тому участку вакуумной системы, где имеется источник паров

Для разборных металлических вакуумных систем, в которых необходимо обеспечить значительную скорость откачки, обычно используется металлическая горизонтальная охлаждаемая ловушка со щитками, изображенная на рис. 11.

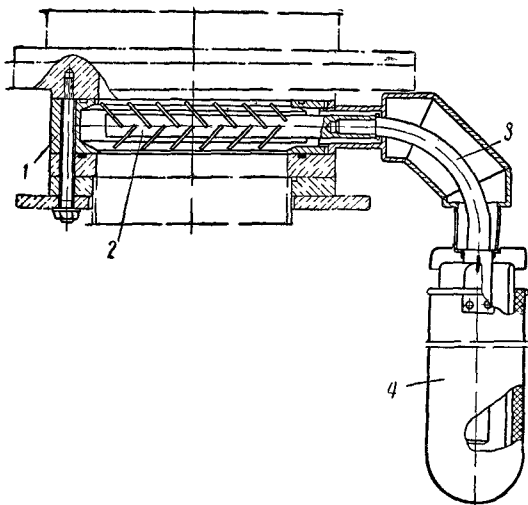


Рис. 11. Металлическая горизонтальная охлаждаемая ловушка со щитками:

1 — корпус, 2 — вымораживающее устройство, 3 — хладопровод, 4 — сосуд Дьюара

Ловушка состоит из корпуса 1, выполненного в виде металлического кольца, вымораживающего устройства 2, хладопровода 3 и сосуда Дьюара 4. Вымораживающее устройство представляет собой медный стержень с припаянными к нему в виде «елочки» медными пластинами, перекрывающими входное сечение насоса таким образом, чтобы ловушка была непросматриваемой на свет. Молекулы пара, диффундирующие из насоса, летят, благодаря высокому вакууму, по прямолинейным путям, вследствие чего неизбежно попадают на медные пластины и оседают на них. Медный стержень хладопровода погружается в сосуд Дьюара с жидким азотом. Хладопровод и связанные с ним пластины вымораживающего устройства в процессе эксплуатации имеют температуру около -180° . При таких низких температурах давление паров масел и ртути, используемых в пароструйных насосах, а также давление паров воды уменьшается на несколько порядков, в результате чего существенно улучшается предельный вакуум, который может быть получен в откачиваемом объеме.

Помимо вымораживания паров улучшение предельного вакуума может быть достигнуто за счет использования специальных поглотителей газа. Процесс поглощения газа твердыми телами происходит как вследствие явления адсорбции, т. е. поглощения газа путем удерживания его поверхностью твердого тела, так и вследствие явления абсорбции, т. е. поглощения газа в результате проникновения его внутрь твердого тела. Особенно хорошо поглощают газы пористые и мелкокристаллические вещества, также как активированный древесный уголь, силикагель, алюмогель и др.

Однако в производстве электровакуумных приборов по целому ряду причин более широкое применение получили другие виды газопоглотителей, которые делятся на испаряющиеся и не испаряющиеся.

К первой группе относятся такие, которые в процессе откачки прибора или же в отпаянном приборе подвергаются интенсивному нагреву, в результате которого они испаряются и в виде налета (зеркала) осаждаются на более холодных стенках внутри прибора.

Из испаряющихся поглотителей в вакуумных лампах накаливания широко используется красный фосфор. Порошок красного фосфора в виде спиртовой суспензии наносится на нить накала лампы и при первом же включении ее после отпайки распыляется, образуя прозрачный налет на внутренних стенках стеклянной колбы, который жадно поглощает оставшиеся в колбе газы. Большим достоинством фосфора, имеющим существенное значение для источника света, является то, что слой фосфора предохраняет колбу от потемнения, которое может иметь место в результате испарения вольфрамовой спирали в процессе эксплуатации лампы.

В приемно-усилительных лампах и других электровакуумных

приборах в качестве испаряющегося поглотителя широкое применение находит металлический барий. Поскольку барий, реагируя с кислородом воздуха и влагой, теряет свою активность, то с целью защиты от атмосферного влияния его помещают в специальную защитную оболочку. Бариевый поглотитель в зависимости от рода защитной оболочки называют «феба» (в железной оболочке), «ниба» (в никелевой оболочке) и «куба» (в медной оболочке). Помещенный внутрь вакуумного прибора барий после откачки прибора распыляют, применяя для этой цели нагрев токами высокой частоты.

Помимо чистого бария в электровакуумном производстве используются также бариево-алюминиевые таблетки, таблетки «бато» (смесь бариево-алюминиевого сплава, окиси железа и тория), баталовый поглотитель (состоящий из карбонатов стронция и бария), бериллат бария и другие испаряющиеся поглотители.

В отличие от испаряющихся поглотителей, неиспаряющиеся поглотители используются в том виде и в том месте, в каком они введены в прибор в процессе его изготовления. В качестве неиспаряющихся поглотителей чаще всего используются тантал, цирконий, титан, торий и др. Характерной особенностью неиспаряющихся поглотителей является то, что интенсивное поглощение ими газов происходит только в том случае, если они нагреты до высокой температуры, при которой может возникнуть химическая реакция между поглотителем и остаточными газами или образование твердых растворов. Поэтому неиспаряющиеся поглотители чаще всего наносятся в виде порошка на те детали прибора, которые в процессе эксплуатации нагреваются до высокой температуры (несколько сот градусов).

В результате использования различного рода газопоглотителей значительно облегчается задача получения и непрерывного поддержания высокого вакуума в процессе длительной эксплуатации отпаянных приборов.

4. Новые методы откачки

Поскольку работа любого пароструйного насоса всегда сопровождается неизбежным, хотя бы и малым, проникновением паров рабочей жидкости в откачиваемый объем, что в целом ряде случаев (например, в высоковольтных установках) совершенно недопустимо, в последние годы была предпринята разработка новых методов получения высокого вакуума, не связанных с использованием рабочей жидкости.

Откачивающим устройством без рабочей жидкости является ионный насос, в котором возбуждается электрический разряд в магнитном поле, приводящий к интенсивной ионизации молекул откачиваемого газа с последующим удалением ионов за счет воздействия электрического поля.

На рис. 12 схематически изображено устройство одного из опытных ионных насосов с быстротой действия 3000—7000 л/сек. Корпус 1 насоса, являющийся одновременно анодом, представляет собой металлическую трубу длиной 4,5 м. На концах трубы расположены два полых вольфрамовых катода. Катод 2, расположенный у выпускного патрубка, является подогревным и используется в качестве источника электронов (эмитер). Второй катод 3 — холодный и служит для отражения электронов (отражатель). Между катодами и корпусом насоса подано постоянное напряжение около 300 в.

Присоединяемый к откачиваемому объему впускной патрубок 4 насоса расположен в середине трубы. В центральной части трубы имеется внутренний соленоид 5, обе боковые зоны окружены наружными соленоидами 6. Соленоиды служат для создания магнитного поля.

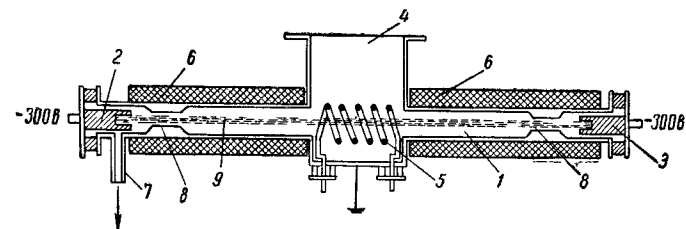


Рис. 12 Ионный насос:
1 — корпус (анод), 2 — катод (эмитер), 3 — катод (отражатель), 4 — впускной патрубок, 5 — внутренний соленоид, 6 — наружный соленоид, 7 — выпускной патрубок, 8 — сужение, 9 — столб электрического разряда

Электроны, эмитируемые с горячего катода 2, ускоряются под действием электрического поля, но не могут сразу попасть на анод, так как магнитное поле ограничивает их пробег, заставляя двигаться по тугой спирали от эмитера к отражателю. Отравившись от отражателя, находящегося под тем же потенциалом, что и эмитер, электроны колеблются в разряде между эмитером и отражателем. Сталкиваясь с молекулами откачиваемого газа, электроны ионизируют их. Образующиеся при этом положительные ионы перемещаются под действием электрического поля к катодам, отдают им свой заряд, и как нейтральные молекулы откачиваются насосом предварительного разрежения.

Для того чтобы воспрепятствовать проникновению нейтральных молекул газа из выпускного патрубка обратно в сторону впускного патрубка, в трубке насоса вблизи катодов сделаны сужения 8, диаметр которых лишь на немного превышает диаметр столба электрического разряда 9. Благодаря этому все проходящие через сужения молекулы вновь попадают в разряд, ионизируются и в виде положительных ионов опять возвращаются к

катодам. Для обеспечения интенсивного разряда выпускное давление поддерживается с помощью насоса предварительного разрежения равным $3 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

Быстрота откачки воздуха в сечении фланца впускного патрубка насоса данной конструкции при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. достигает 7000 л/сек. Предельное разрежение, создаваемое насосом, составляет $8 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. при величине выпускного давления около $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Мощность, потребляемая насосом, равна 42 квт.

Существенным недостатком ионного насоса является значительное потребление электроэнергии, которая в основном расходуется на поддержание электрического и магнитного полей. Так, например, насос описанной конструкции потребляет примерно в 15 раз большую мощность, чем паромасляный насос, имеющий примерно такую же быстроту действия. К отрицательным особенностям ионного насоса относится также довольно быстрое разрушение катода вследствие непрерывного испарения вольфрама.

Большое потребление электроэнергии, сложность устройства и эксплуатации, а также значительные габариты ионных насосов существенно ограничивают в настоящее время их промышленное использование.

Значительно большую перспективу промышленного применения имеет ионно-испарительный (ионно-сорбционный) насос, в котором откачка достигается в результате непрерывного процесса поглощения газа за счет испарения и конденсации на стенках насоса титана, причем процесс поглощения активизируется благодаря частичной ионизации откачиваемого газа.

Изображенный на рис. 13 ионно-испарительный насос представляет собой вертикальную цилиндрическую камеру, стенки которой охлаждаются водой, непрерывно циркулирующей по емеевику. По оси камеры расположена катушка с титановой проволокой, которая непрерывно разматывается с помощью специального подающего механизма. Проходя через кольцеобразную нить накала (которая имеет отрицательный потенциал относительно проволоки), титановая проволока интенсивно бомбардируется электронами, эмитируемыми нитью накала, и почти мгновенно испаряется (в других конструкциях насосов испарение титана осуществляется за счет его соприкосновения с графитовым стержнем, разогреваемым до высокой температуры в результате электронной бомбардировки).

Конденсируясь на стенках камеры, титан интенсивно поглощает находящиеся в объеме газы, в первую очередь водород, кислород и азот. Остальные газы, в частности инертные, ионизируются электронами, эмитируемыми с нити накала и ускоряющимися в электрическом поле, создаваемом разностью потенциалов между сеткой, расположенной вблизи стенок, и нитью накала; образующиеся ионы, попадая на стенку насоса, находящуюся

под нулевым потенциалом, замуровываются непрерывно напыляемым на стенку слоем титана.

Рабочий диапазон давлений, охватываемых этим насосом $10^{-4} - 10^{-9}$ мм рт. ст., предельный вакуум 10^{-9} мм рт. ст.

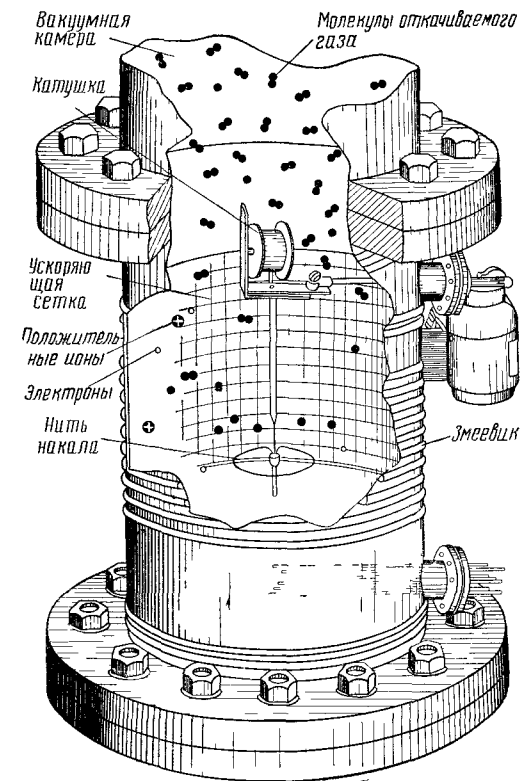


Рис 13. Ионно-испарительный насос

В настоящее время известны ионно-испарительные насосы с быстрой действия до 10 тыс. л/сек (по водороду).

Характеристики одного из образцов ионно-испарительного насоса, у которого потребляемая мощность 1 квт и расход титана 7 мг/мин, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Газ	Скорость откачки, л/сек	Давление, мм рт. ст.
Водород	7000—8000	$3 \cdot 10^{-6}$
Азот	6500—7500	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Кислород	6500—7500	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Воздух	1000	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Аргон	9	$4 \cdot 10^{-6}$
Гелий	4	$3 \cdot 10^{-6}$

Существенным недостатком ионно-испарительного насоса является сложность устройства и эксплуатации, а также резко выраженная зависимость его скорости действия от рода откачиваемого газа.

5. Устройство вакуумных систем

Вакуумная система обычно состоит из откачиваемого объема, вакуумных насосов, вентилях и затворов. Соединение различных элементов вакуумной системы, в том числе и соединение откачиваемого объема с насосом, производится через соединительные трубопроводы.

Поскольку всякий трубопровод оказывает сопротивление потоку газа, то на концах трубопровода получается перепад давлений, вследствие чего эффективная скорость откачки объема оказывается меньше, чем скорость действия насоса.

Пропускная способность трубопровода (количество газа, проходящее через трубопровод в единицу времени) зависит прежде всего от степени вакуума, определяющей режим течения газа по трубопроводу. Кроме того, она зависит от размеров и формы сечения трубопровода, а также от температуры и рода откачиваемого газа.

На практике обычно приходится иметь дело с установками, в которых производится откачка воздуха при комнатной температуре, а трубопроводы, как правило, имеют круглое сечение. При этом в низковакуумных коммуникациях чаще всего имеет место вязкостный режим течения газа, при котором пропускная способность трубопровода зависит как от его размеров, так и от давления газа. В высоковакуумных коммуникациях в условиях молекулярного режима течения, когда столкновения между молекулами газа практически отсутствуют, движение их по трубопроводу происходит за счет соударения со стенками, вследствие чего пропускная способность трубопровода зависит только от его размеров.

Для получения в вакуумной установке заданного предельного вакуума при минимальном времени, затрачиваемом на ее откачку, к конструкции вакуумной аппаратуры и материалам, используемым при ее изготовлении, предъявляется целый ряд требований.

Важнейшим из них является герметичность как самих деталей, из которых собрана вакуумная установка, так и мест их соединения.

Для получения надежной герметичности при изготовлении вакуумных систем в первую очередь применяют материалы, имеющие плотную структуру, которая обеспечивает их газонепроницаемость даже при малых толщинах (стекло, малоуглеродистая и нержавеющая сталь, алюминий, медь и различного рода сплавы).

Неразборные вакуумно-плотные соединения обычно осуществляются с помощью сварки и пайки, а для разборных соединений используются прокладки из резины, фторопласта, меди и алюминия.

Другое не менее важное требование заключается в том, что газоотделение стенок вакуумной аппаратуры должно быть минимальным. Поэтому используемый для изготовления вакуумной аппаратуры материал должен иметь при рабочей температуре минимальную упругость собственных паров и легко отдавать ранее поглощенные газы в процессе обезгаживания вакуумной установки. С этой точки зрения следует избегать применения пористых материалов, так как помимо значительной газопроницаемости они в течение длительного времени выделяют ранее поглощенные газы и пары. Добиться достаточно чистой промывки материалов, имеющих пористую структуру, также не удается, поскольку грязь вместе с органическими растворителями забивается во все поры и трещины и удалить ее оттуда очень трудно. Для изготовления вакуумной аппаратуры преимущественно применяют материалы, имеющие плотную структуру, и прежде всего те из них, которые легко обрабатываются и полируются, что в значительной мере облегчает промывку деталей органическими растворителями для удаления жиров и других загрязнений с поверхности деталей перед их сборкой.

Следует также иметь в виду, что стенки вакуумной аппаратуры должны обладать прочностью, достаточной для того, чтобы противостоять внешнему атмосферному давлению.

В лабораторной практике при выполнении различного рода экспериментальных работ существенное значение имеет возможность быстрой переделки вакуумных установок, а поэтому в качестве конструкционного материала для их изготовления часто используется стекло. Стекло обладает способностью легко принимать и сохранять любую нужную форму, при прогреве с его поверхности достаточно легко удаляются ранее адсорбированные газы, оно практически газонепроницаемо, а давление насыщенного пара стекла настолько мало, что не оказывает влияния на степень вакуума в системе.

Различные детали и участки вакуумной системы, изготовленные из стекла, могут иметь как подвижные, так и неподвижные соединения. Неподвижные соединения осуществляются спаиванием стеклянных деталей при помощи газовой горелки, причем надежные спаи могут быть получены в том случае, если детали изготовлены из стекол с близкими коэффициентами теплового расширения, вследствие чего предотвращается возможность возникновения в месте спаивания внутренних напряжений, делающих спай хрупким и ненадежным. Герметичность подвижных соединений (краны, шлифы) достигается за счет взаимной притирки соприкасающихся поверхностей с последующим нанесением на них

специальной вакуумной смазки, обладающей низкой упругостью пара ($10^{-6} - 10^{-8}$ мм рт. ст. при 20°). Ловушки, краны и шлифы всех типов, а также другие стеклянные детали чаще всего изготавливаются из стекол, обладающих высокой термической и химической стойкостью и хорошими изоляционными свойствами. Детали после изготовления, как правило, подвергаются отжигу при температуре около 500° для снятия внутренних напряжений.

Стеклянные краны, применяемые для разобщения участков вакуумной системы, бывают четырех типов: угловые (рис. 14, а), проходные (рис. 14, б), трехходовые (рис. 14, в) и порционные (рис. 14, г). Основными частями каждого крана являются конусообразная пробка с отверстиями и муфта с патрубками, служащими для присоединения крана к вакуумной системе.

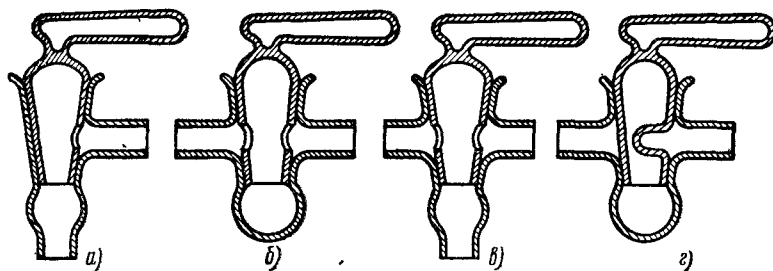


Рис. 14. Стеклянные краны:

а — угловой, б — проходной, в — трехходовой, г — порционный

В том случае, если прибор после откачки необходимо наполнить каким-либо газом до определенного малого давления, обычно применяют порционный кран, у которого внутри пробки впаяна трубочка небольшого объема. При повороте крана в сторону баллона с газом эта трубочка, будучи запаянной с одного конца, наполняется газом до определенного давления. При повороте пробки крана на 90° трубочка отделяет определенную порцию газа. При дальнейшем повороте пробки крана трубочкой в сторону вакуумной системы газ из трубочки распространяется по всему объему вакуумной системы, чем и осуществляется точная дозировка степени наполнения.

В практике конструирования и эксплуатации вакуумных систем часто приходится устанавливать стеклянные детали на металлических установках и, наоборот, металлические детали на стеклянных установках. Кроме того, иногда возникает необходимость вводить из атмосферы в вакуумную систему электрические проводники. В связи с этим появляется необходимость в осуществлении вакуумно-плотных спаев металлов со стеклом.

Основные требования к материалам, применяемым для изготовления спаев, сводятся к следующему:

1. Металлы и сплавы должны обладать близкими линейными коэффициентами теплового расширения по отношению к стеклам, в которые они впаяваются (за исключением «несогласованных» спаев меди со стеклом).

2. Металлы и сплавы должны хорошо смачиваться размягченным стеклом, так как спай должен быть газонепроницаемым, т. е. вакуумно-плотным.

3. Металлы и сплавы должны быть достаточно тугоплавкими, чтобы выдерживать нагрев, необходимый для впаявания их в стекло.

Основная трудность в выполнении таких спаев заключается в различии линейных коэффициентов теплового расширения металлов и стекол. Поэтому следует различать «согласованные» и «несогласованные» спай металла со стеклом. К первым относятся спайи, в которых металл спаявается непосредственно со стеклом, причем подбираются стекло и металл с близкими друг к другу линейными коэффициентами теплового расширения. Ко

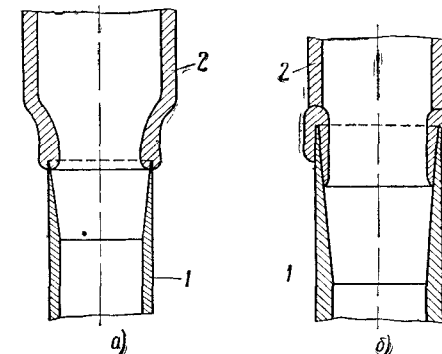


Рис. 15. Спай медной трубки со стеклом:

а — с легкоплавким стеклом, б — с тугоплавким стеклом, 1 — медная трубка, 2 — стекло

вторым относятся спайи, в которых линейный коэффициент теплового расширения металла значительно отличается от линейного коэффициента теплового расширения стекла, а опасные напряжения, которые могут возникнуть при этих условиях, ослабляются путем применения мягких металлов. Иногда для этой цели используют промежуточные стекла и переходные спайи, причем спай между металлом и последним из стекол является спаем «согласованного» типа.

Типичным примером «согласованного» спая металла со стеклом являются широко распространенные штампованные стержневые спайи, когда проволоки проводятся через стеклянную трубку с фланцем (тарелочкой), которая затем нагревается до размягчения в определенном месте и сжимается клещами так, что проволоки оказываются запрессованными в стекле.

Типичным примером «несогласованного» спая является трубчатый спай меди со стеклом (рис. 15). В этом случае концы медной трубки растачивают на конус с очень малой толщиной стенки (несколько сотых долей миллиметра), к которой затем припаяется стекло. В этих спаях медь имеет более высокий коэффициент теплового расширения, чем стекло. Однако, имея малую толщину стенок, она обладает мягкостью и текучестью,

достаточными для того, чтобы деформироваться при изменении температуры и обеспечить таким образом ослабление напряжений в месте спаев.

Для впайки тонких проволок (диаметр которых не превышает 1 мм) в легкоплавкое стекло, линейный коэффициент теплового расширения которого обычно лежит в пределах $(80 - 100) \cdot 10^{-7}$, чаще всего используют платинит. Платинитовая проволока состоит из железо-никелевого сердечника и тонкой медной оболочки, покрытой закисью меди и бурой. Закись меди способна растворяться как в самой меди, так и в стекле, что обеспечивает хорошую смачиваемость стеклом поверхности платинита.

В тех случаях, когда необходимо подводить значительные токи (десятки ампер), в качестве материалов для впаев в стекло применяют молибден и вольфрам в виде проволок и стержней

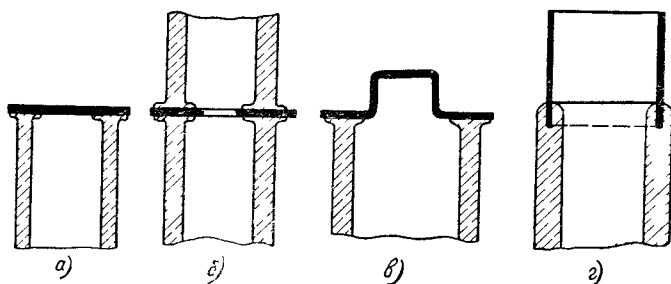


Рис. 16. Спаев ковара со стеклом:
а — дисковый, б — кольцевой, в — колпачковый, г — цилиндрический

диаметром от 0,5 до 8 мм, причем перед впажкой место впаива предварительно оплавляется стеклом. Для впаивания проволочных вводов из молибдена и вольфрама используются тугоплавкие сорта стекол, линейный коэффициент теплового расширения которых лежит в пределах $(40 - 50) \cdot 10^{-7}$.

Для изготовления спаев металлических и стеклянных трубок используются также специальные сплавы. Так, для спаев с легкоплавким стеклом используются высокохромистые стали (феррохром, фурудит), для спаев с тугоплавкими стеклами применяют ковар (сплав никеля, кобальта и железа). Ковар позволяет осуществить разнообразнейшие конструкции дисковых, кольцевых и цилиндрических спаев со стеклом, ряд примеров которых представлен на рис. 16.

В отличие от лабораторных вакуумных установок небольшого объема, состоящих почти целиком из стекла, корпуса больших металлических выпрямителей, электронных микроскопов, печей для вакуумной пайки и плавки, установок для нанесения покрытий под вакуумом и другой вакуумной аппаратуры чаще всего изготавливаются путем сварки стальных листов различной толщины

и геометрических размеров. Металлические оглибки из-за своей пористой структуры для изготовления высоковакуумной аппаратуры, как правило, не применяются. Исключение составляет качественное чугунное и стальное литье, которое используется для изготовления корпусов вращательных насосов предварительного разрежения. Однако в этом случае к отливкам предъявляются очень жесткие требования как в части отсутствия трещин, пор и раковин, так и с точки зрения газонепроницаемости используемого материала. Из стального проката для изготовления сварных корпусов наиболее широкое применение имеют малоуглеродистая и нержавеющая стали. Из цветных металлов чаще всего используют алюминий, медь, латунь.

Неразборные вакуумные соединения осуществляются за счет сварки и пайки металлических деталей. Поэтому одним из важнейших свойств материалов, применяемых для изготовления вакуумных систем, помимо их большой плотности и малого газовыделения, является их способность к свариванию и спаиванию.

Разборные вакуумно-плотные соединения осуществляются с помощью резиновых и металлических прокладок. Для умеренных температур и нагрузок наиболее часто в качестве прокладочного материала используется вакуумная резина. На рис. 17 показаны два широко распространенные типа фланцевых соединений для труб диаметром от 10 до 500 мм, уплотненных кольцевой прокладкой, вырезанной из вакуумной резины.

Для уплотнения металлических и стеклянных труб небольшого диаметра (меньше 30 мм) применяют изображенное на рис. 18 грибовое уплотнение, которое осуществляется за счет плотного прилегания к трубе кольцевой резиновой прокладки, сжимаемой гайкой и шайбой.

Значительное выделение газов из резины и недопустимость прогрева установки с целью ее обезгаживания при использовании резиновых уплотняющих прокладок существенно ограничивают применение резины в тех случаях, когда в вакуумной установке требуется получить давление ниже 10^{-6} мм рт. ст.

В таких случаях широкое применение находит изображенное на рис. 19 разборное вакуумно-плотное фланцевое соединение с металлической прокладкой, имеющее канавочно-клиновидный уплотняющий профиль. В качестве прокладок используются кольца из

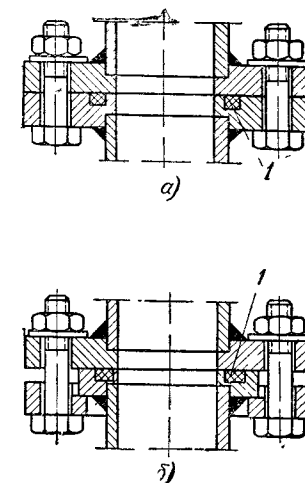


Рис. 17 Фланцевые соединения с резиновой уплотняющей прокладкой.
а — простое фланцевое соединение, б — фланцевое соединение с накидным кольцом, 1 — резиновая прокладка

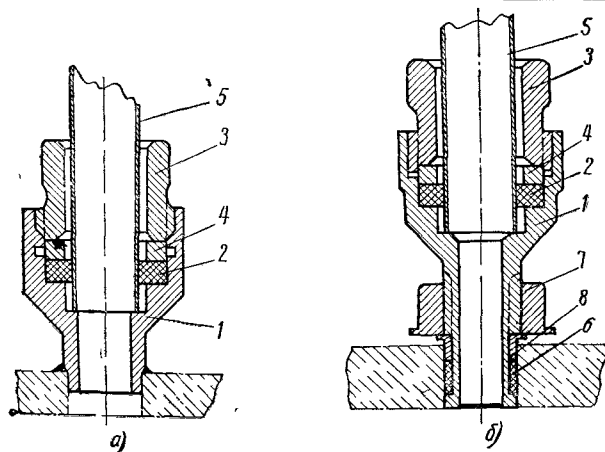


Рис. 18. Вакуумные вводы с резиновым уплотнением (вакуумные грибки):

a — стационарный, *b* — съемный, 1 — корпус ввода, 2 — резиновая прокладка, 3 — гайка, 4 — шайба, 5 — стеклянная трубка, 6 — резиновое кольцо, 7 — гайка, 8 — шайба

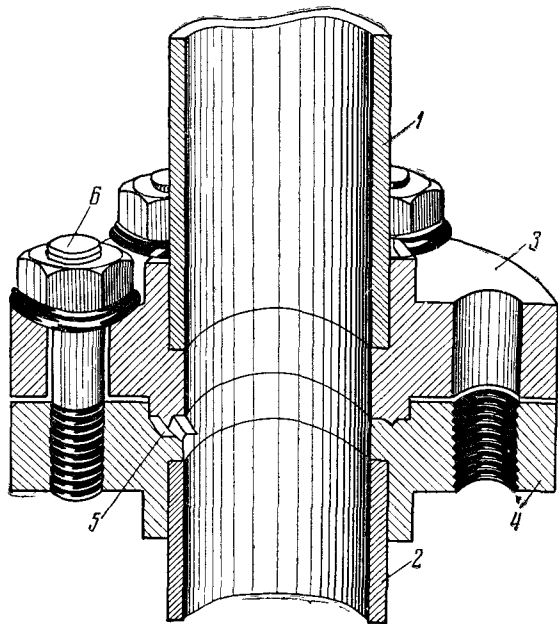


Рис. 19. Фланцевое соединение с металлической уплотняющей прокладкой:

1 и 2 — трубопроводы, 3 и 4 — фланцы, 5 — металлическая уплотняющая прокладка, 6 — болт с шайбой и гайкой

листовой холоднокатаной меди или листового мягкого алюминия толщиной 0,2—1 мм. Такого рода фланцевые соединения допускают длительный нагрев до температуры 600° при использовании медных прокладок и до 400° при использовании прокладок из алюминия.

Помимо резиновых и металлических прокладок в качестве уплотнительного материала иногда применяется фторопласт (тефлон). Он выделяет значительно меньше газов, чем резина, химически стоек в широком диапазоне температур, допускает нагрев до 250°. Хорошие электроизоляционные свойства фторопласта позволяют применять его для электрических вводов в вакуумную систему.

Для осуществления перемещения и вращения отдельных элементов аппаратуры в вакууме без нарушения герметичности соединения в зависимости от технических требований (диаметра вала, числа оборотов, величины передаваемого усилия, длины продольного перемещения и т. д.) используют самые различные устройства.

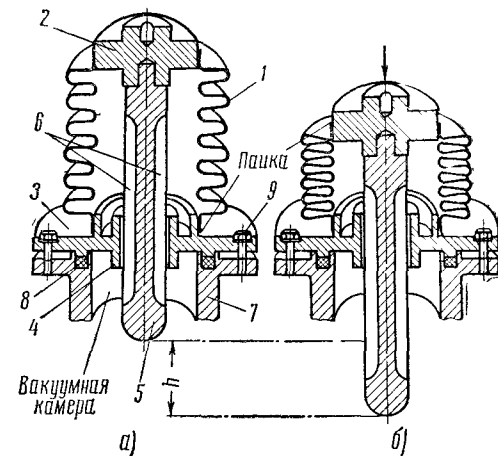


Рис. 20. Сильфонное уплотнение перемещающегося стержня:

a — стержень в верхнем положении (сильфон не сжат), *b* — стержень в нижнем положении (сильфон сжат), 1 — сильфон, 2 — крышка, 3 — фланец, 4 — направляющая втулка, 5 — стержень, 6 — пазы, 7 — фланец камеры, 8 — резиновая прокладка, 9 — болт с шайбой и гайкой

Если через стенку вакуумной камеры необходимо передавать вращение с небольшим числом оборотов в минуту, то для этого в простейшем случае можно использовать обыкновенные шлифы со смазкой, изготовленные из стекла, латуни или меди.

Для осуществления возвратно-поступательного перемещения штока в стенке вакуумной камеры часто используются гофрированные трубки (сильфоны), изготовленные из стали, томпака, меди или латуни. За счет упругой деформации гофр сильфоны можно легко сгибать, растягивать и сжимать. Сильфонное уплотнение перемещающегося стержня показано на рис. 20. Сильфон 1 припаян сверху к крышке 2, а снизу к фланцу 3. В этом фланце имеется направляющая втулка 4, в которой центрируется и перемещается стержень 5, укрепленный на резьбе в крышке 2. Для откачки воздуха из внутренней полости сильфона в стержне 5 имеются пазы 6. Уплотнение фланца 3 в соединении с фланцем

камеры 7 осуществляется при помощи резиновой кольцевой прокладки 8, прижимаемой при завинчивании болтов 9. Крышка 2 на разборном соединении жестко связана с управляющей системой, которая выполняется с учетом того, что сильфон под действием атмосферного давления стремится сжаться (например, при диаметре сильфона 50 мм, сжимающее усилие составляет около 20 кг).

Сильфонное соединение используют также для передачи колебательного и вращательного движений в вакуумную установку.

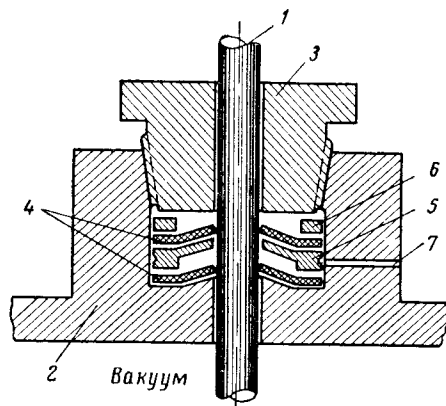


Рис. 21. Сальниковое уплотнение перемещающегося стержня:

1 — вал, 2 — корпус, 3 — зажимная гайка, 4 — резиновые прокладки, 5 и 6 — металлические шайбы, 7 — отверстие для подачи смазки

Для передачи движения в вакуум используют также различные уплотнения сальникового типа. На рис. 21 показан общий вид такого рода уплотнения с применением резиновых прокладок и металлических шайб. Для уплотнения служат две прокладки из маслостойкой вакуумной резины 4, между которыми проложена металлическая шайба 5. На верхнюю резиновую прокладку накладывается еще одна металлическая шайба 6, прижимаемая сверху зажимной гайкой 3. Для надежной работы уплотнения вал 1 должен быть хорошо, но не слишком обильно, смазан

высококачественной вакуумной смазкой.

Для разобщения отдельных частей вакуумной системы в промышленных вакуумных установках широкое применение находят вентили и затворы. Как правило, вентиль или затвор не пропускает воздух из атмосферы при любом положении клапана, а при разумно выбранной конструкции срабатывает достаточно легко и быстро, не требуя большого усилия для надежного уплотнения клапана.

Для трубопроводов предварительной откачки, а также для тех высоковакуумных коммуникаций, где не требуется большая пропускная способность, чаще всего применяются двусторонние вентили. У таких вентилях диаметр максимального проходного отверстия обычно не превышает 160 мм. Конструкция этих вентилях во многом напоминает вентили, применяемые в водопроводных и газовых системах, но обладает своими характерными особенностями, связанными с повышенными требованиями к герметичности.

Наиболее широко распространенная конструкция вакуумного

вентиля с резиновым уплотнением седло-клапан изображена на рис. 22. В резьбовой канавке крышки 7 вентиля перемещается шток 6 с закрепленным снизу клапаном 3. Крышка вентиля герметично соединена с его верхним патрубком благодаря применению разборного вакуумно-плотного соединения с использованием уплотняющей кольцевой прокладки 9, вырезанной из листовой вакуумной резины. Сильфон 5 одним своим краем припаян к клапану, а другим к крышке, благодаря чему осуществляется уплотнение резьбовой канавки между штоком и крышкой корпуса. Сильфонное уплотнение вращающегося штока обеспечивает хорошую герметичность поворотного механизма, но срок службы сильфона невелик, а замена его связана с трудностями. Поэтому для более надежной и безаварийной работы вентиля зачастую предпочитают пользоваться не сильфонным уплотнением перемещающегося штока, а уплотнением с использованием резиновых прокладок.

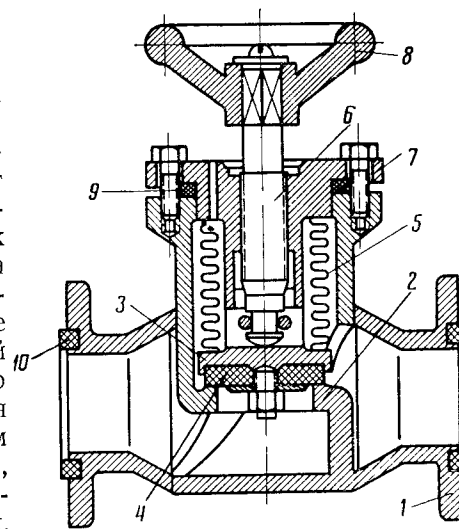


Рис. 22. Вакуумный вентиль с резиновым уплотнением седло-клапан:

1 — корпус, 2 — седло корпуса, 3 — клапан, 4 — уплотняющая прокладка, 5 — сильфон, 6 — шток, 7 — крышка, 8 — маховик, 9 и 10 — уплотняющие прокладки.

Для трубопроводов, имеющих небольшое проходное отверстие, в установках с особо жесткими требованиями к предельному вакууму применяются вентили с металлическим уплотнением седло-клапан. Изображенный на рис. 23 цельнометаллический вентиль используется в установках, имеющих давление порядка 10^{-7} мм рт. ст. при небольших скоростях откачки. Уплотнение в такого рода вентилях осуществляется по линии плотного прилегания конического клапана 1 к цилиндрическому седлу 2. В целях получения надежного уплотнения сменный клапан делают из мягкого материала (медь, никель, алюминий, реже латунь), а седло — из твердого материала (закаленная сталь). Вакуумная плотность цельнометаллических вентилях обеспечивается при помощи мембран и сильфонов. Герметичное соединение мембраны с корпусом вентиля и с подвижным клапаном осуществляется при помощи разборного соединения с канавочно-клиновым уплотняющим профилем, что позволяет, в случае необходимости, легко заменить мембрану и клапан. Применение штока с дифференциальной резьбой позволяет осуществлять точное перемещение клапана.

В том случае, когда наряду с большой пропускной способностью требуется значительная быстрота манипуляции вентилем, обычно используются вакуумные затворы.

Промышленностью выпускаются затворы с диаметрами условного прохода от 85 до 500 мм. Конструкция вакуумных затворов

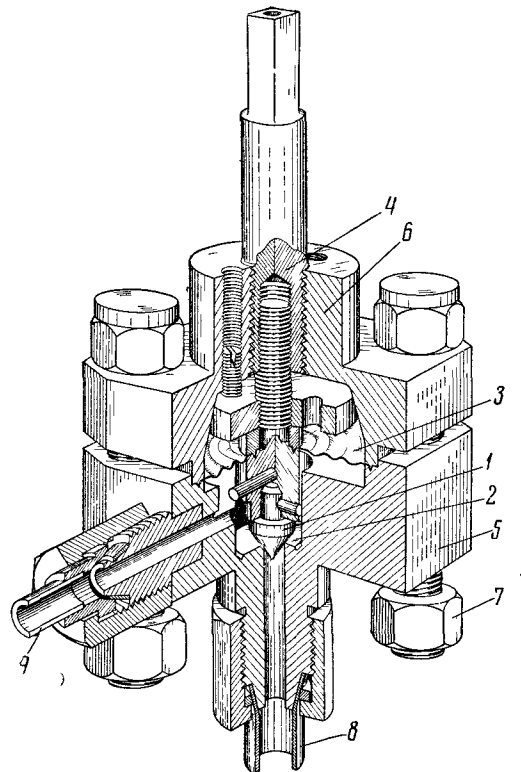


Рис. 23 Целнометаллическая конструкция вакуумного вентиля.

1 — конический клапан, 2 — седло, 3 — мембрана, 4 — шток, 5 — корпус, 6 — крышка, 7 — болт, 8 и 9 — трубопроводы

предусматривает их установку в специальных переходных патрубках между насосом и откачиваемой системой.

Механизм металлического вакуумного затвора с резиновым уплотнением, изображенный на рис. 24, расположен на отдельном фланце 1. Необходимое перемещение перекрывающего диска 2 при закрывании и последующем поджатии его к уплотняющей прокладке 3 осуществляется посредством рычажно-эксцентрикового механизма 4. Соединение привода с эксцентриковым валом механизма осуществляется посредством муфты 5. Уплотнение

вала осуществляется за счет использования резиновых уплотнителей и металлических шайб.

Высоковакуумные насосы присоединяются обычно к вакуумным системам не непосредственно, а через переходные коммуникации; кроме того, между насосом и системой в большинстве случаев устанавливают вакуумные затворы, позволяющие отключать насос от системы, а также охлаждаемые ловушки для улавливания паров рабочей жидкости, уходящих из насоса в систему.

В связи с этим промышленностью выпускаются специальные вакуумные откачные установки, включающие в себя высоковаку-

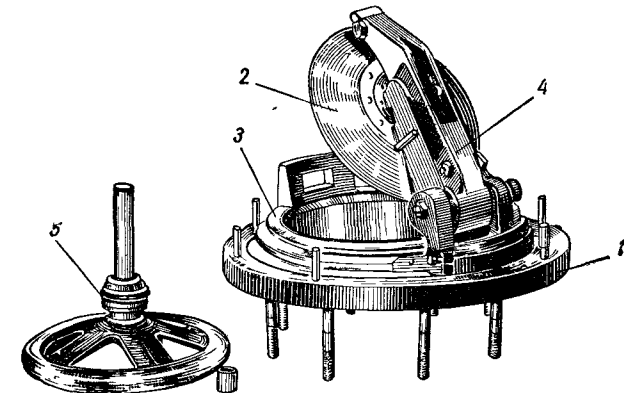


Рис. 24 Металлический вакуумный затвор с резиновым уплотнением.

1 — фланец, 2 — перекрывающий диск, 3 — уплотняющая прокладка, 4 — рычажно эксцентриковый механизм, 5 — муфта

умный пароструйный насос, ловушку, охлаждаемую жидким азотом, и переходный патрубок с затвором. Эти установки называются вакуумными агрегатами.

Изображенный на рис. 25 типичный вакуумный агрегат представляет собой вакуумную установку, состоящую из паромасляного насоса 1, укрепленного на раме 2, вертикального патрубка 3 для присоединения к откачиваемому объему, высоковакуумного затвора 4, щитка электроуправления 5, вакуумной ловушки 6 и сосуда Дьюара 7.

Патрубок 3 представляет собой сварную конструкцию с тремя присоединительными фланцами, из которых один служит для присоединения агрегата к откачиваемому объему, второй — для присоединения патрубка к фланцу затвора и третий — для присоединения к крышке.

Система охлаждения агрегата обеспечивает подачу проточной воды в маслоотражатель и паромасляный насос. Установленный

на агрегате гидро-контакт обеспечивает нормальное охлаждение агрегата и срабатывает, выключая электронагреватель насоса, при уменьшении расхода охлаждающей воды ниже нормы

Быстрота действия современных вакуумных агрегатов достигает нескольких тысяч литров в секунду.

6 Техника измерения вакуума

Для измерения низких давлений применяют манометры, работа которых основана на использовании различных физических принципов. Так для измерения низкого вакуума используют жидкостные U-образные и механические манометры; для измерения среднего вакуума — теплоэлектрические и радиоактивные манометры; для измерения высокого вакуума — компрессионные, магнитные электроразрядные и ионизационные манометры. Область применения каждого из этих манометров показана на рис. 26

Устройство жидкостного U-образного манометра показано на рис. 27, а и б. Разность уровней жидкости (в качестве которой чаще всего используется ртуть) в обоих коленах U-образной стеклянной трубки является мерой разности давлений. Если одно колено манометра находится под атмосферным давлением (рис. 27, а), а другое

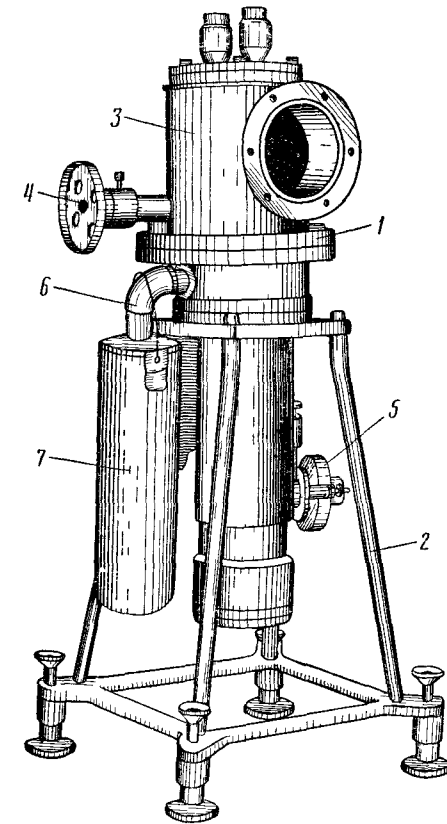


Рис. 25 Вакуумный агрегат

1 — паромасляный насос, 2 — рама, 3 — вертикальный патрубок, 4 — высоковакуумный затвор, 5 — щиток электроуправления, 6 — вакуумная ловушка, 7 — сосуд Дьюара

соединяется с откачиваемым объемом, то такой манометр называется открытым. Поскольку в манометрах этого типа пониженное давление сравнивается с атмосферным, то для определения абсолютного значения давления в откачиваемом объеме необходимо знать истинную величину атмосферного давления, что является существенным недостатком жидкостных манометров открытого типа.

У закрытых U-образных манометров (рис. 27, б) закрытое колено предварительно откачивается до низкого давления и по-

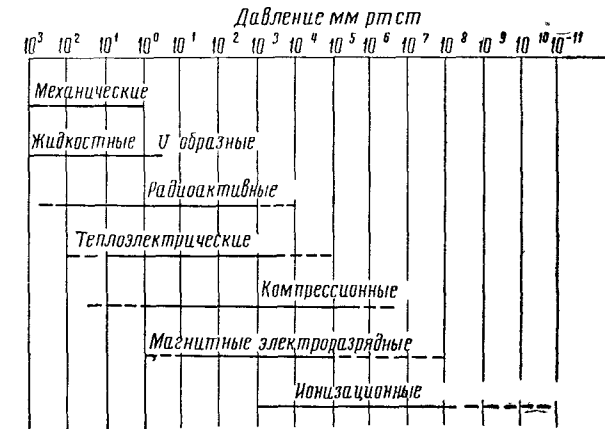


Рис. 26 Области давлений, охватываемые манометрами различных типов

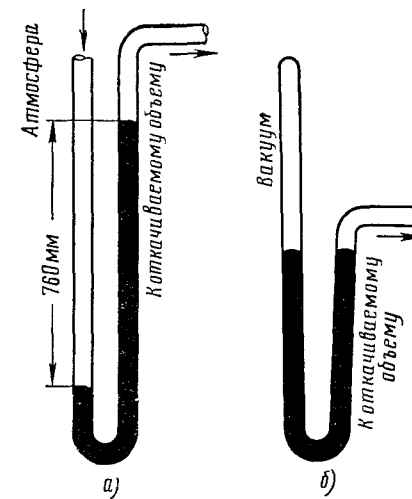


Рис. 27 Жидкостные U-образные манометры

а — открытый б — закрытый

казание манометра соответствует значению абсолютного давления в вакуумной установке.

Примером механического манометра является изображенный на рис. 28 стрелочный металлический манометр. Хотя он менее точен, чем жидкостный U-образный манометр, но зато имеет меньшие размеры и более прочен, что имеет существенное значение при использовании в производственных условиях. Основной деталью этого манометра является пружина 1, сделанная из закрытой с одного конца трубки, которая при помощи трубки 2 присоединяется к откачиваемому объему. На наружную поверхность пружины 1 всегда воздействует атмосферное давление. До

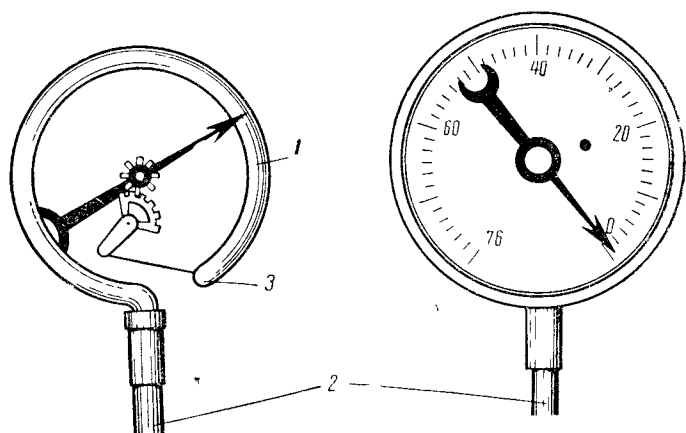


Рис. 28. Стрелочный механический манометр:
1 — полая пружина, 2 — трубка для присоединения к вакуумной системе, 3 — подвижной конец пружины

тех пор, пока внутри пружины сохраняется атмосферное давление, стрелка манометра стоит в начале шкалы (на нуле). По мере понижения давления в откачиваемом объеме внутренняя поверхность пружины испытывает воздействие меньшего давления, вследствие чего пружина начинает сжиматься, и ее подвижный конец 3 перемещается ближе к неподвижному концу. При этом система передачи заставляет стрелку перемещаться по шкале в направлении против часовой стрелки. Деление шкалы, против которого останавливается стрелка, показывает разность между атмосферным и измеряемым давлением.

Описанная конструкция механического манометра обычно применяется при измерении разрежения в диапазоне от 760 до 10 мм рт. ст. Жидкостные U-образные манометры обычно измеряют давление до 1 мм рт. ст.

Измерение давлений ниже 1 мм рт. ст. чаще всего производится с помощью термоэлектрических манометров. К числу теп-

лоэлектрических манометров (рис. 29) относятся термопарные манометры и манометры сопротивления.

Принцип действия термоэлектрического манометра основан на том, что теплопроводность разреженного газа зависит от его давления. Поэтому, если в откачиваемый объем поместить нагретую металлическую нить, то условия ее охлаждения за счет

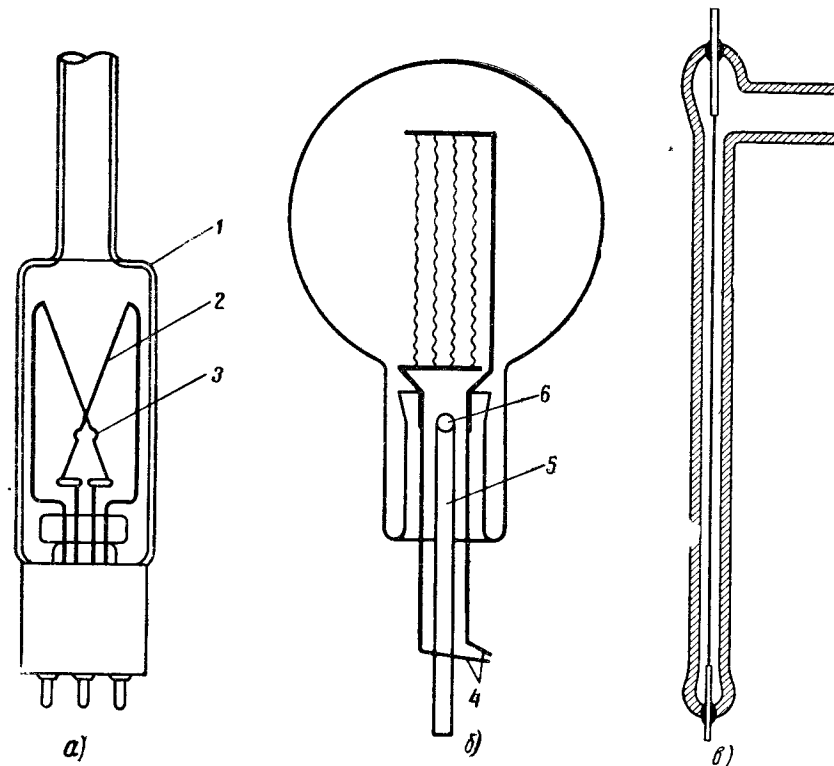


Рис. 29. Термоэлектрические манометры:
а — термопарный, б — манометр сопротивления для измерения давлений на откачных автоматах, в — манометр сопротивления для измерения давлений миллиметрового диапазона, 1 — баллон, 2 — нить (подогреватель), 3 — термопара, 4 — выводы нити накала, 5 — откачивающая трубка (штегель), для присоединения к гнезду автомата, 6 — откачиваемое отверстие

отдачи тепла холодным стенкам в значительной мере будут определяться теплопроводностью окружающего ее газа, а следовательно, его давлением.

В термопарном манометре (рис. 29, а) термопара 3, состоящая из хромелевой и копелевой проволоки диаметром 50 мк, своим спаем приварена к платиновому подогревателю. При неизменном токе накала подогревателя в результате изменения давления меняется температура спаев, а следовательно, и термо-э. д. с. термопары, по величине которой судят о давлении.

Помимо термопарных манометров для измерения давления в диапазоне $10-10^{-3}$ мм рт. ст. широкое применение находят манометры сопротивления. Манометр сопротивления (рис. 29, б, в) представляет собой нагреваемую электрическим током металлическую нить, помещенную в баллон, присоединенный к вакуумной системе. При уменьшении давления теплопроводность газа снижается, вследствие чего при неизменном токе накала повышается температура нити, а следовательно, и ее сопротивление, по величине которого можно судить о давлении в откалиброванной системе.

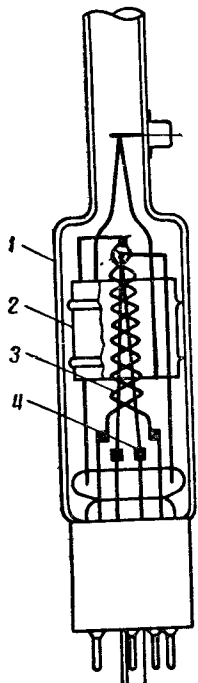


Рис. 30 Ионизационный манометр:
1 — баллон, 2 — коллектор, 3 — анод (сетка), 4 — катод

В целях достижения максимальной чувствительности манометра для изготовления нити применяют металлы с возможно большим температурным коэффициентом электрического сопротивления (вольфрам, платина).

Для измерения давлений ниже 10^{-3} мм рт. ст. применяется ионизационный манометр (рис. 30), который является разновидностью электронной лампы трехэлектродного типа.

Накаленный катод 4 (вольфрамовая проволока, изогнутая в виде шпильки) испускает электроны, которые ускоряются по направлению к положительно заряженной сетке 3, играющей в данном случае роль анода. Электроны, сталкиваясь на своем пути с атомами и молекулами остаточных газов, производят их ионизацию и уходят на сетку. Положительные ионы остаточных газов притягиваются отрицательно заряженным коллектором 2 и отдают ему свой заряд. Число образующихся в манометре ионов пропорционально плотности газа и, следовательно, ионный ток может служить мерой давления газа в системе, к которой присоединен манометр.

Недостатком ионизационного манометра с накаленным катодом является ограниченный срок службы (порядка 100 часов). Кроме того, наличие накаленного катода делает недопустимым повышение давления в манометре выше 10^{-3} мм рт. ст., так как в этом случае катод перегорает.

Кроме манометров, где ионизация осуществляется электронами, существуют радиоактивные манометры, в которых ионизация производится альфа-частицами, испускаемыми радиоактивными веществами. Диапазон давлений, измеряемых радиоактивным манометром, составляет от 10^2 до 10^{-3} мм рт. ст. В качестве источника альфа-частиц применяется радий.

Радиоактивный ионизационный манометр, имеющий так же,

как и манометр с накаленным катодом, достаточно широкий диапазон измеряемых давлений и линейность градуировочной кривой, обладает еще рядом достоинств, к числу которых относится простота конструкции и практически неограниченный срок службы. Существенным недостатком радиоактивного манометра является довольно низкая чувствительность и наличие вредного для здоровья людей гамма-излучения, а также газообразных продуктов радиоактивного распада (таких, например, как радон).

Изображенный на рис. 31 радиоактивный манометр выполнен в виде закрытого с одной стороны тонкостенного металлического цилиндра 4, служащего анодом, по оси которого через изолятор 6 укреплен стержневой коллектор ионов 3. С другой стороны в цилиндре помещен радиоактивный источник 2. Альфа-частицы, вылетая из источника, ионизируют на своем пути газ; образующиеся положительные ионы уходят на коллектор, создавая в цепи коллектора ионный ток.

Толщина слоя радиоактивного вещества невелика, так как с ее увеличением чувствительность манометра растет незначительно, зато количество вредного для здоровья гамма-излучения резко возрастает.

В последнее время для измерения давлений в диапазоне $1-10^{-6}$ мм рт. ст. широкое применение начинают находить магнитные электроразрядные манометры.

Одна из конструкций магнитного электроразрядного манометра представлена на рис. 32.

Кольцо 1, являющееся анодом, помещено в прямоугольной коробке 2 из красной меди, стенки которой являются катодными пластинами. Катодные пластины помещены между полюсными наконечниками 3 постоянных магнитов 4. Таким образом, магнитная система, закрытая кожухом 5, находится вне вакуума. Патрубок 6 служит для присоединения манометра к вакуумной системе. На анодный вывод 7, припаянный через проходной изолятор 8 к верхней крышке коробки 2 через балластное сопротивление подается постоянное напряжение величиной от нескольких сот до нескольких тысяч вольт.

Для уяснения принципа работы манометра рассмотрим характер движения электрона в разрядном промежутке и причину возникновения разряда между электродами манометра. Если

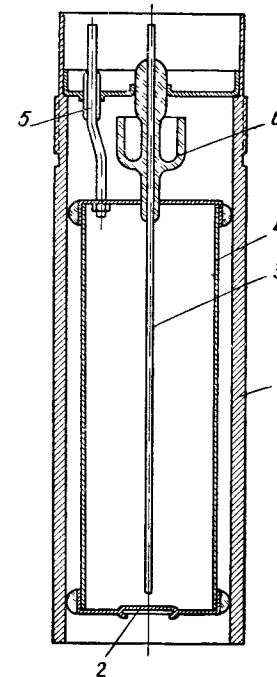


Рис. 31. Радиоактивный манометр:
1 — корпус, 2 — радиоактивный источник, 3 — коллектор ионов, 4 — анод, 5 и 6 — изоляторы

вблизи одной из катодных пластин по каким-либо причинам (например, в результате космической радиации) появится электрон, то под влиянием совместного действия электрического и магнитного полей он будет двигаться к положительно заряженному аноду по траектории, имеющей вид винтовой линии с малым шагом. Двигаясь по винтовой линии, электрон не может сразу попасть на анод, а благодаря кольцеобразной форме последнего пролетает внутри анодного кольца по направлению к противоположной пластине катода, отражается от нее и движется в обратном направлении, совершая, таким образом, многократные колебания около плоскости анодной рамки. Благодаря такому удлинению пути электронов значительно возрастает вероятность их встречи с молекулами остаточных газов и ионизация последних.

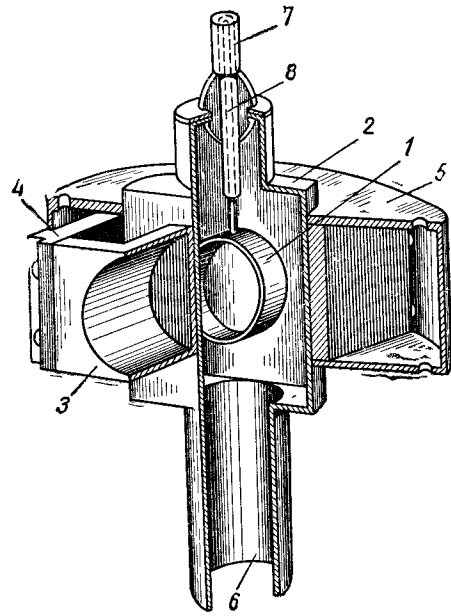


Рис. 32 Магнитный электроразрядный манометр

1 — анодное кольцо, 2 — прямоугольная коробка, 3 — полюсные наконечники, 4 — магниты, 5 — кожух, 6 — патрубок, 7 — анодный вывод, 8 — проходной изолятор

Сравнительно большая величина разрядного тока, который является мерой давления газа, позволяет измерять его непосредственно стрелочным микроамперметром без всякого предварительного усиления. Это обстоятельство, а также отсутствие в манометре накаливаемого катода, который может перегореть в случае аварийного повышения давления в вакуумной системе, указывают на преимущества магнитных электроразрядных манометров перед ионизационными манометрами с накаливаемым катодом и делают их весьма перспективными. Выпускаемые отечественной промышленностью манометры изображены на рис. 33, а, б, в.

Теплоэлектрические, ионизационные, радиоактивные и магнитные электроразрядные манометры не поддаются точному расчету и обычно градуировка этих манометров выполняется по ртутному компрессионному манометру.

Устройство ртутного компрессионного манометра показано на

рис. 34. Манометр состоит из стеклянного баллона 1 с измерительным капилляром 2, верхний конец которого запаян. От баллона вниз идет припаянная к нему стеклянная трубка 3, имеющая ответвление 4, соединяющее измерительную часть манометра

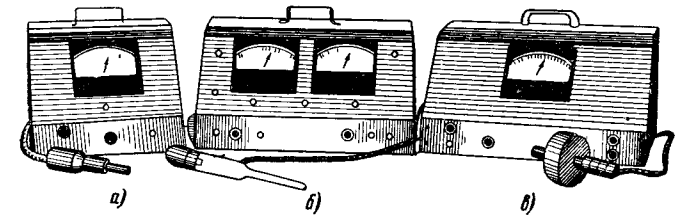


Рис. 33. Манометры для измерения низких давлений, выпускаемые отечественной промышленностью.

а — термопарный манометр с датчиком, б — комбинированный манометр с термопарным датчиком и манометрической лампой ионизационного манометра, в — магнитный манометр с датчиком

с вакуумной установкой. В свою очередь ответвление 4 имеет разветвление в виде сравнительного капилляра 5, внутренний диаметр которого одинаков с измерительным капилляром 2.

К нижнему концу трубки 3 через резиновый шланг 7 присоединен резервуар 6 со ртутью. Резервуар сверху открыт и, следовательно, над уровнем ртути в нем давление всегда равно атмосферному.

По мере понижения давления в вакуумной системе уровень ртути в трубке 3 будет постепенно подниматься, однако все время оставаясь ниже ответвления 4 (поз. II).

Для того чтобы измерить давление в вакуумной системе, поднимают резервуар со ртутью, вследствие чего поднимается и уровень ртути в трубке 3. Когда ртуть заполняет ответвление 4, она разобщает измерительную часть манометра с вакуумной

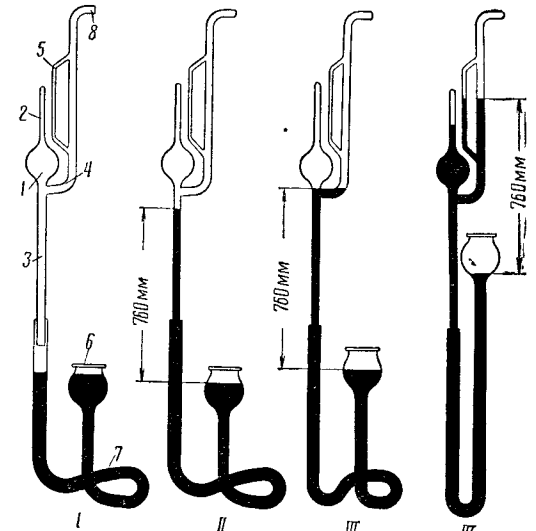


Рис. 34 Ртутный компрессионный манометр:

1 — стеклянный баллон, 2 — измерительный капилляр, 3 — стеклянная трубка, 4 — ответвление, 5 — сравнительный капилляр, 6 — резервуар со ртутью, 7 — резиновый шланг, 8 — трубка для присоединения к вакуумной системе

системой (поз. III). При дальнейшем поднимании резервуара 6 стеклянный баллон 1 заполняется ртутью, а газ сжимается в верхней части измерительного капилляра 2 (поз. IV).

Вследствие уменьшения объема, занимаемого газом, его давление возрастает настолько, что становится доступным непосредственному измерению. Мерой давления служит разность уровней ртути в измерительном и сравнительном капиллярах.

Компрессионный манометр является абсолютным манометром, т. к. его можно рассчитать и проградуировать без сравнения с показаниями какого-нибудь другого манометра.

7. Получение и измерение сверхвысокого вакуума

При изучении физических явлений, происходящих на поверхности твердых тел, возникает необходимость в получении давлений 10^{-10} — 10^{-11} мм рт. ст., т. к. только при таких низких давлениях оказывается возможным сохранить изучаемую поверхность практически свободной от молекул газа в течение длительного времени. Область давлений ниже 10^{-7} мм рт. ст. условно называют областью сверхвысокого вакуума.

Если с помощью ловушек, охлаждаемых жидким водородом ($t = -253^\circ$), и поглотителей газа такой вакуум может быть получен в отпаянных сосудах, то для того, чтобы его измерить, необходимы специальные приборы, т. к. даже ионизационные манометры (обычной конструкции) для измерения столь низких давлений совершенно непригодны. Причиной этого является возникновение в цепи коллектора манометра фонового тока, величина которого не зависит от давления. Появление этого фонового тока происходит вследствие бомбардировки положительно заряженной сетки летящими с катода электронами, в результате которой сетка становится источником «мягкого» рентгеновского излучения, вызывающего заметный выход электронов с облучаемого коллектора. Так как уход электронов с коллектора равнозначен появлению в цепи коллектора тока положительных ионов, то при достаточно низких давлениях (около 10^{-8} мм рт. ст.), когда ионный ток очень мал, ионизационный манометр практически показывает лишь фотоэлектронный ток, чем собственно и обуславливается нижний предел измеряемых манометром давлений.

Фоновый ток пропорционален площади поверхности коллектора; поэтому для уменьшения величины фонового тока при измерении очень малых давлений необходимо уменьшить поверхность коллектора, что достигается изготовлением коллектора из тонкой проволоки.

Манометр, предназначенный для измерения очень малых давлений (до 10^{-10} мм рт. ст.), представляет из себя стеклянную колбу, на ножке которой укреплен цилиндрический сетка. Внутри сетки, вдоль ее оси, натянута тонкая проволока, служащая коллектором ионов, а снаружи сетки укреплены два симметрич-

ных катода. Благодаря такому устройству на коллектор попадает лишь малая доля рентгеновского излучения сетки, в результате чего резко снижается фоновый ток.

Такого рода манометр пригоден не только для измерения давлений до 10^{-10} мм рт. ст., но его можно использовать также в качестве своеобразного ионного насоса для получения сверхвысокого вакуума.

Процесс поглощения остаточных газов внутри манометрической лампы происходит, во-первых, за счет того, что получающиеся в результате ионизации остаточных газов положительные ионы устремляются к коллектору ионов и к стенкам, где они нейтрализуются и адсорбируются; во-вторых, одновременно имеет место химическое поглощение ряда газов (кислорода, хлора и др.) в результате их взаимодействия с нагретым катодом.

Манометрическая лампа может поглотить лишь ограниченное количество остаточных газов и сохраняет свои откачивающие свойства в течение длительного промежутка времени лишь в том случае, если предварительно давление в вакуумной установке снижено до 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст. в результате совместной работы пароструйного и механического насосов.

Установка, предназначенная для получения сверхвысокого вакуума, обычно изготавливается из тугоплавкого стекла, за исключением кранов, в качестве которых используются цельнометаллические вентили, подобно изображенному на рис. 23. Переход от стального корпуса вентиля к стеклу осуществляется за счет использования спаев кобальта со стеклом.

Применение в установке каких-либо вакуумных смазок, из-за значительной упругости их паров, исключено.

После предварительной откачки установки насосами производится обезгаживание стеклянных деталей путем их длительного прогрева в течение нескольких часов в условиях непрерывной откачки. После этого производится обезгаживание внутренних частей ионизационных манометров путем интенсивной электронной бомбардировки при положительном потенциале коллектора ионов. Затем перекрывают металлический вентиль, отсоединяя тем самым откачиваемый объем от паромасляного насоса, после чего откачка объема производится за счет работы ионизационного манометра. Помимо ионизационного манометра с горячим катодом для получения сверхвысокого вакуума иногда используют также откачивающее действие магнитного электроразрядного манометра специальной конструкции.

8. Испытание вакуумной аппаратуры на герметичность

Разрежение, получаемое в собранной вакуумной системе, зависит прежде всего от эффективной быстроты действия вакуумного насоса, от степени герметичности и количества газов, выделяемых стенками системы. Если в системе даже после ее продолжитель-

ной откачки и тренировки не удастся получить высокий вакуум, то это может быть вызвано тремя основными причинами: неисправностью насоса, натеканием в систему атмосферного воздуха или же значительным газовыделением стенок системы.

Для того чтобы узнать, какая из указанных причин является основной, перекрывают трубопровод, соединяющий вакуумную систему с насосом, и следят за изменением давления в изолированной системе. Если давление в системе после ее отсоединения от насоса практически остается неизменным в течение нескольких минут, но в то же время его величина значительно выше предельного вакуума насоса, то это значит, что система не может быть откачана из-за неисправности насоса. Если после перекрытия вентиля или затвора, соединяющего откачиваемый объем с насосом, давление в системе сначала быстро возрастает, а затем изменяется мало, то это указывает на наличие в системе источников газовыделения. Наконец, если давление в изолированной от насоса системе в течение продолжительного отрезка времени непрерывно растет, то в системе имеется натекание атмосферного воздуха.

О величине натекания нельзя судить только по изменению давления, т. к. одинаковые по величине течи в разных объемах создадут неодинаковые натекания. Величина натекания чаще всего выражается в $л \cdot мк/сек$. Эта величина соответствует течи, в результате которой в изолированном сосуде объемом в 1 л за 1 сек. давление повышается на 1 $мк$.

При малой величине течи иногда очень трудно разделить натекание и газовыделение системы. В этом случае к вакуумной системе через ловушку с жидким азотом присоединяют термомпарный или ионизационный манометры в зависимости от того, какой вакуум в системе. Поскольку большинство паров и газов, выделяемых стенками вакуумной системы, конденсируются при температуре жидкого азота, то заливка его в ловушку вызывает резкое изменение показаний манометра в том случае, если в системе имеются внутренние источники газовыделения. Если же в системе имеются неплотности, через которые в нее натекает атмосферный воздух, то показания манометра практически не изменяются, поскольку находящиеся в атмосфере газы при этих условиях не конденсируются.

После того как удалось установить, что в вакуумной системе действительно имеется натекание атмосферного воздуха через неплотности, с помощью соответствующих затворов и вентилях изолируют ее отдельные участки и вновь производят измерение быстроты возрастания давления уже в каждом из изолированных участков системы. Таким путем можно быстро обнаружить тот участок системы, в котором имеются главные течи. При этом нет необходимости в каждом изолированном участке обязательно иметь свой манометр: о наличии течи в нем

можно судить по возрастанию давления в системе после соединения с ней ранее изолированного участка.

Когда обнаружен участок системы, в котором имеются главные течи, то определить их местонахождение можно путем закрашивания или нанесения другим способом уплотняющих веществ на «подозрительные» места до тех пор, пока изменение давления внутри системы не укажет, что течь закрыта уплотнителем. В качестве временного уплотнителя могут применяться, например, глифталевый лак, спиртовой раствор шеллака, смесь пчелинового воска со смолой и т. п.

Для отыскания течей в вакуумных установках, частично или полностью изготовленных из стекла, чаще всего применяется метод высокочастотного разряда. Если поднести к поверхности стеклянной откачанной установки незаземленный электрод высокочастотного трансформатора Тесла, то в установке возникает разряд, свечение которого зависит от состава газов в установке (свечение происходит при давлении в установке от нескольких миллиметров ртутного столба до $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.). Если течи в установке нет, то свечение будет серым, если имеется течь, через которую в установку проникает воздух, то свечение будет красным или лиловым.

Место течи в стеклянной установке можно обнаружить, перемещая острие электрода трансформатора Тесла по поверхности установки. С конца электрода в стекло будет бить беспорядочный пучок искр до тех пор, пока острие не приблизится к течи на расстояние порядка 1 см. В этом случае разряд формируется в тонкий ярко-белый искровой пучок, направленный своим концом точно в место течи.

При применении метода высокочастотного разряда для обнаружения течей в металлических вакуумных установках можно либо использовать имеющиеся в ней стеклянные детали, либо установить специальный разрядник перед вращательным насосом. Возбуждая в разряднике или в стеклянной части установки электрический разряд и последовательно смачивая «подозрительные» металлические части установки пробным веществом (чаще всего ацетоном) следят за изменением цвета свечения разряда, который является индикатором наличия течи. Проникновение паров ацетона в вакуумную установку окрашивает свечение в голубой цвет вместо розового, характерного для разреженного воздуха.

Хотя метод высокочастотного разряда достаточно прост, однако он ограничен довольно узким диапазоном давлений и мало чувствителен при отыскании течей в металлических установках. В последних часто применяется метод опрессовки (испытание давлением). При применении этого метода внутри испытуемого объекта создают избыточное давление (в зависимости от прочности системы оно может быть от 1,1 до 5 $атм$), после чего с помощью того или иного приема наблюдают за газом, выходящим через течи, имеющиеся в системе.

Наиболее крупные течи нетрудно обнаружить по отклонению пламени газовой горелки под действием вырывающихся через течь струек газа. Более мелкие течи удается обнаружить, если смачивать поверхность установки мыльным раствором и наблюдать за образованием пузырей. Если необходимо испытать отдельные узлы или детали, то их можно погрузить в ванну с водой и, создав внутри детали избыточное давление, наблюдать за выделением пузырьков газа. Метод опрессовки наиболее целесообразно применять при испытании достаточно прочных металлических деталей. Наличие в вакуумной системе тонкостенных деталей (сильфонов, мембран, спаев металла со стеклом) значительно ограничивает применение описанного метода. Чувствительность метода может быть повышена при применении легких газов, быстрее протекающих через малые отверстия (так, например, водород почти в 4 раза быстрее протекает через течь, чем воздух, а гелий — в 2 раза быстрее). Поскольку водород в смеси с воздухом может образовывать взрывоопасную смесь, то для целей течеиспытания предпочитают использовать гелий.

Разновидностью метода опрессовки является наполнение испытываемого объема галоидсодержащим газом (фреоном, хлороформом, четыреххлористым углеродом и т. д.) с последующим обнаружением течи снаружи с помощью галоидного течеискателя.

В основе устройства галоидного течеискателя лежит явление термоионной эмиссии. Рядом исследователей было замечено, что накалившая до красного каления платина излучает положительные ионы даже в воздухе, причем ток ионов возрастает с повышением температуры по закону, аналогичному закону термоэлектронной эмиссии из накаливаемых катодов.

Принцип действия галоидного течеискателя основан на том, что эмиссия положительных ионов с накаливаемой платиновой проволоки сильно увеличивается в присутствии галоидов.

Чувствительным элементом (датчиком) прибора является устройство (рис. 35), состоящее из двух концентрических платиновых цилиндров, заключенных в оболочку из нержавеющей стали.

Внутренний электрод-эмитер 1 находится под напряжением +250 в по отношению к внешнему электроду-коллектору 2. Эмитер нагревается от внутреннего платинового нагревателя до температуры 800—900°. При более низких температурах эмиссия положительных ионов слишком мала, при более высоких температурах она делается нестабильной.

Через цилиндрический канал между электродами с помощью небольшого вентилятора 3 просасывается воздух. При чистом воздухе от эмитера к коллектору идет очень слабый ток положительных ионов. Попадание же воздуха, содержащего частицы галоидов, немедленно вызывает в датчике возрастание величины

ионного тока, который усиливается и измеряется выходным прибором 4, а также отмечается звуковым сигналом. Датчик помещается в щупе прибора (рис. 36).

В зависимости от размеров вакуумной установки и требуемой чувствительности ее наполняют фреоном или другим галоидосо-

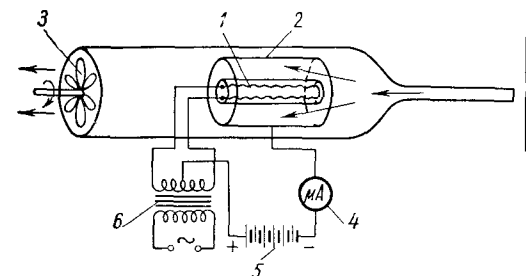


Рис. 35 Устройство галоидного течеискателя
1 — внутренний электрод (эмитер), 2 — внешний электрод (коллектор), 3 — вентилятор, 4 — выходной прибор, 5 — батарея, 6 — трансформатор накала

держащим газом после предварительной откачки, либо без нее. После этого обследуют «подозрительные» места щупом прибора. Изменение частоты звукового сигнала и отклонение стрелки выходного прибора сигнализируют о наличии утечки пробного газа из испытуемого объекта.

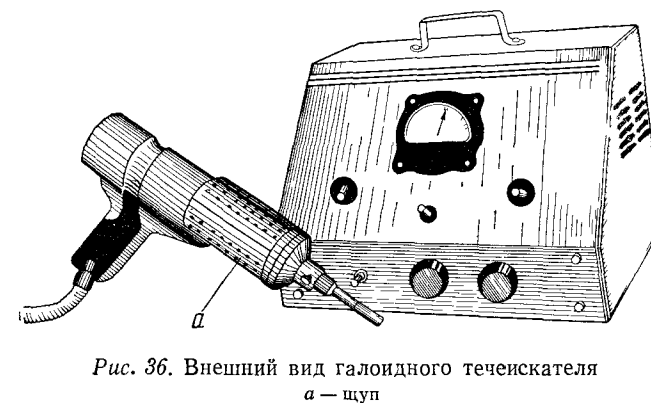


Рис. 36. Внешний вид галоидного течеискателя
a — щуп

Наиболее совершенным прибором, позволяющим обнаруживать очень малые течи (до 10^{-4} л·мк/сек) является передвижной масс-спектрометрический гелиевый течеискатель (рис. 37).

Течеискатель состоит из трех основных частей: масс-спектрометрической камеры, помещенной в зазор постоянного магнита, вакуумной системы и электрической части.

Камера представляет собой латунную цилиндрическую коробку со съемной крышкой, уплотняемой кольцевой резиновой прокладкой. Схема работы течеискателя показана на рис. 38. В камере имеется накаленный катод 1, излучающий электроны, которые ускоряются электрическим полем и попадают в коробку ионизатора 2. Здесь молекулы остаточных газов и пробного газа (гелия) подвергаются ионизации. Поскольку на коробку ионизатора 2 подан положительный потенциал относительно заземленной входной диафрагмы 3, между ними образуется электрическое поле, вытягивающее положительные ионы, которые выходят через диафрагму в виде слабо расходящегося пучка. Под действием электрического и магнитного полей ионы описывают круговые траектории, радиусы которых пропорциональны корню из массы иона, и через выходную диафрагму 5 попадают на коллектор ионов 6.

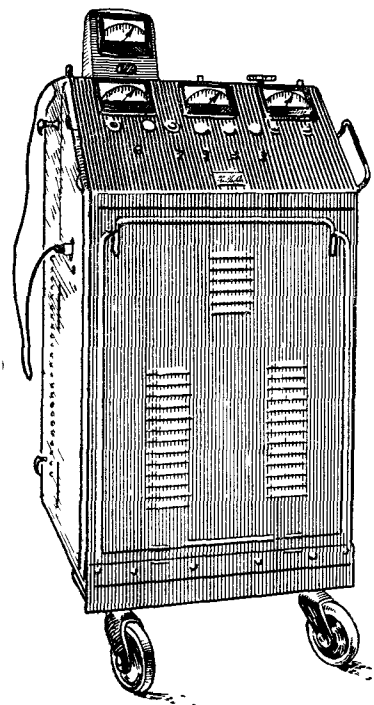


Рис. 37. Внешний вид масс-спектрометрического гелиевого течеискателя

Напряжение между коробкой ионизатора 2 и выходной диафрагмой 5, ускоряющее ионы, а также напряженность магнитного поля и расположение диафрагм выбраны таким образом, что на коллектор могут попадать только ионы гелия, вызывающие протекание тока по высокооhmному сопротивлению 7 в цепи коллектора. Падение напряжения на этом сопротивлении усиливается с помощью специального усилителя У.

Выбор гелия в качестве пробного газа обусловлен очень малым содержанием его в атмосфере и практически полным отсутствием среди газов, выделяемых стенками вакуумных установок. В связи с этим величина фона (показаний прибора, не зависящих от количества гелия, проникающего через течи при испытании системы) оказывается незначительной, вследствие чего возможно обнаруживать малейшее возрастание концентрации гелия в вакуумной системе.

Рабочее давление в масс-спектрометрической камере обычно не превышает $2,5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. и измеряется с помощью магнитного электроразрядного манометра, который одновременно является датчиком управляющей цепи, автоматически отключающей

питание катода масс-спектрометра и снимающей ускоряющее напряжение при повышении давления в камере выше допустимого предела.

Вакуумная система течеискателя соединяется с испытуемой аппаратурой через дросселирующий вентиль. Между вентилем и камерой помещается охлаждаемая ловушка. Она предназначена для конденсации паров при проверке на герметичность загрязненной аппаратуры (испытание чистой аппаратуры может быть

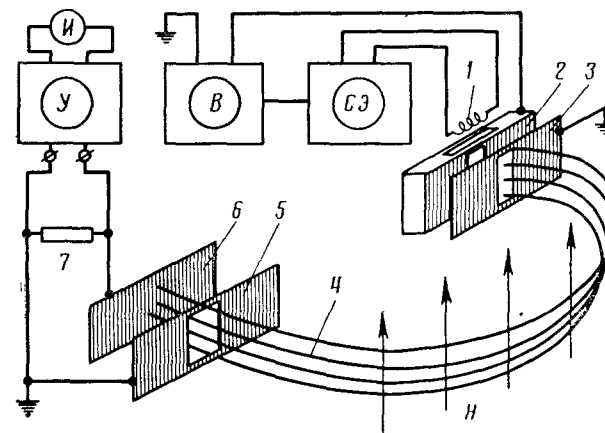


Рис. 38. Схема работы передвижного масс-спектрометрического гелиевого течеискателя

1 — катод, 2 — коробка ионизатора, 3 — входная диафрагма, 4 — ионный луч, 5 — выходная диафрагма, 6 — коллектор ионов, 7 — высокооhmное сопротивление, H — направление магнитного поля, СЭ — стабилизатор эмиссии, В — выпрямитель (источник разгоняющего напряжения), У — усилитель ионного тока, И — выходной измерительный прибор

произведено без заливки жидкого азота в ловушку). К нижнему фланцу ловушки присоединяется паромасляный насос с воздушным охлаждением. Предварительное разрежение, необходимое для его нормальной работы, создается небольшим механическим насосом.

Гелиевый течеискатель может быть применен для обнаружения течей и измерения натекания в самых разнообразных производственных и лабораторных установках

Присоединение течеискателя к испытуемой вакуумной аппаратуре следует производить через короткий и широкий трубопровод и работать при таком положении вентиля, когда в рабочей камере течеискателя давление не превышает $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

При испытании вакуумных установок с собственной насосной группой патрубков течеискателя рекомендуется присоединять к трубопроводу низкого вакуума (между пароструйным и вращательным насосами). При этом получается значительный поток

газа, поступающего в течейскатель, и обеспечивается возможность испытания любой части вакуумной системы (кроме вращательного насоса). Обнаружение течей производится путем последовательного обдувания тонкой струйкой гелия тех мест аппаратуры, герметичность которых вызывает сомнение.

Поскольку в качестве пробного газа используется гелий, который легче воздуха, то обдувание испытываемой аппаратуры следует

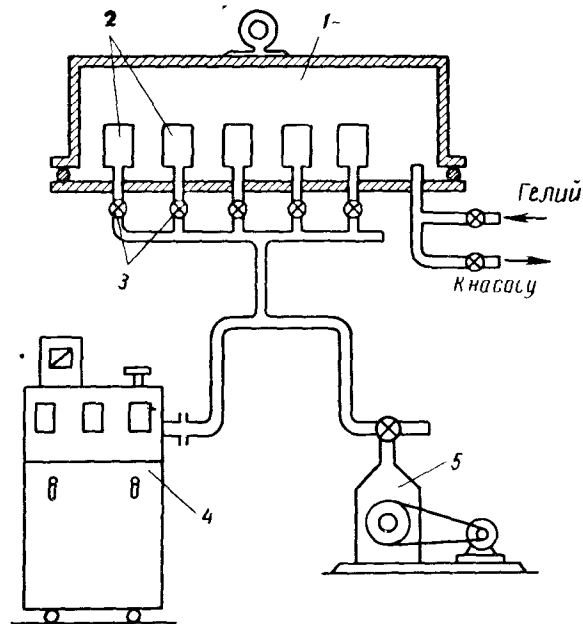


Рис. 39 Испытание на герметичность при помощи гелиевой камеры:

1 — гелиевая камера, 2 — испытываемые детали, 3 — вентили, 4 — течейскатель, 5 — механический насос

начинать с ее верхних частей, проверяя в первую очередь герметичность сварных швов, разборных уплотнителей, мест пайки и т. п.

Если же начать обдувание испытываемой аппаратуры снизу, то гелий, поднимаясь вверх, будет одновременно проникать через неплотности, имеющиеся в верхней части вакуумной системы, вследствие чего трудно будет установить действительное место течи.

В том случае, когда необходимо проверить герметичность большого количества деталей, можно воспользоваться методом гелиевой камеры, при котором все испытываемые детали напаяются на вилку с индивидуальными вентилями, после чего помещаются в атмосферу гелия (рис. 39). Вилка оканчивается общим

трубопроводом, присоединяемым с одной стороны к течейскателю, а с другой — к механическому насосу. Последовательно открывая вентили, соединяющие внутреннюю полость каждой детали с трубопроводом, производят проверку герметичности каждой из них.

Испытание на натекание электровакуумных приборов и их деталей может быть произведено с помощью люминисцентного метода (рис. 40, а, б, в). С этой целью испытываемый объект

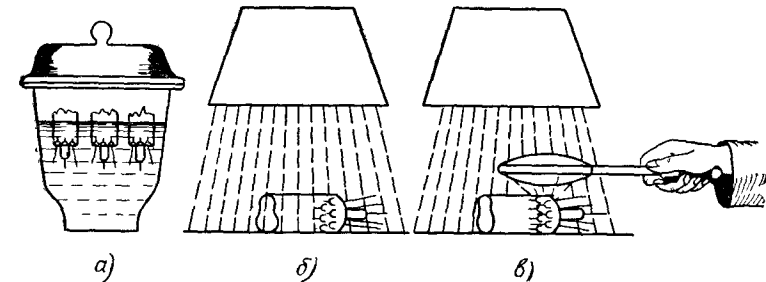


Рис. 40. Обнаружение мест течи люминисцентным методом:

а — образцы, погруженные в раствор, б — образец облучается кварцевой лампой, в — фокусировка ультрафиолетовых лучей лупой

сначала помещается в раствор люминофора. Если в объекте имеется течь, то под действием капиллярных сил раствор постепенно втягивается внутрь течи и на ее противоположной стороне по мере испарения растворителя постепенно накапливается подсушенный люминофор. Если после этого испытываемый объект облучить ультрафиолетовыми лучами, то светящийся люминофор укажет местонахождение течи. Для экранирования видимых лучей, уменьшающих контрастность сигнала, целесообразно применять «черный» фильтр, пропускающий только ультрафиолетовую часть спектра.

III. ПРИМЕНЕНИЕ ВАКУУМА

1. Производство электровакуумных приборов

Электровакуумные приборы представляют собой обширный класс электрических приборов, применяемых в самых различных областях производства, науки и техники.

Основными достоинствами электровакуумных приборов являются их безынерционность (чрезвычайно малое время срабатывания, составляющее миллионные доли секунды), простота и удобство управления электрическим током за счет малых электрических импульсов и ряд других достоинств.

Упрощенная классификация современных электровакуумных приборов представлена на рис. 41.

В соответствии с происходящими в приборах электрическими процессами, назначением и формой электровакуумные приборы можно объединить в три следующие большие группы.

1. Приборы, использующие электрический разряд в высоком вакууме, т. е. в условиях, когда испускаемые катодом электроны двигаются практически без столкновений с атомами и молекулами газа. Это электронные приборы. К ним относятся: приемно-усилительные и генераторные лампы, электронно-лучевые приборы (электронные коммутаторы, приемные и передающие телевизионные трубки, трубки для электронных осциллографов), фотоэлементы с электронной эмиссией, вторично-электронные умножители, рентгеновские трубки и ультравысокочастотные приборы (магнетроны, клистроны и др.).

2. Приборы, использующие электрический разряд в газе, т. е. в условиях, при которых существенное значение имеют столкновение электронов с атомами газа. Это ионные приборы. К ним относятся: приборы с дуговым разрядом (ртутные выпрямители, газотроны, тиратроны), приборы с тлеющим разрядом (сигнальные лампы, стабилизаторы напряжения), различного рода разрядники, а также ионные источники света.

3. Приборы, не использующие электрический разряд в вакууме или газе. В этих приборах ток проходит через проводники или полупроводники, находящиеся в вакууме или в разреженном газе. К ним относятся: вакуумные и газонаполненные лампы накалива-

ния, термопары, барреторы (стабилизаторы тока), полупроводниковые фотоэлементы и т. п.

Для нормальной работы подавляющего большинства современных электровакуумных приборов необходимо обеспечить в них высокий вакуум прежде всего потому, что во многих приборах имеются нагретые до высокой температуры детали. Так, например, в лампах накаливания в качестве источника света используется нагретая до высокой температуры вольфрамовая спираль. В приемно-усилительных и генераторных лампах, в электронно-лучевых и рентгеновских трубках, а также во многих газоразрядных приборах в качестве источника электронов используется накаленный до высокой температуры катод. Если из перечисленных приборов не удалить атмосферный воздух, то спираль или катод сгорят в кислороде воздуха.

Присутствие даже небольшого количества химически активных газов и паров в вакуумной или газонаполненной осветительной лампе накаливания очень вредно отражается на ее работе. Химическое взаимодействие между остаточными газами (водяным паром, кислородом) и накаленной вольфрамовой спиралью вызывает ее интенсивное распыление, приводящее к образованию на колбе темного налета, вследствие чего лампа становится негодной как источник света.

Присутствие химически активных газов в электронной лампе или в другом приборе с накаленным катодом (электронно-лучевой трубке, рентгеновской трубке, тиратроне, газотроне и т. п.) вызывает отравление катода, в результате чего катод теряет свои эмиссионные свойства и прибор выходит из строя.

Но не только одни химически активные газы могут привести в негодность электровакуумный прибор.

Независимо от состава остаточных газов, в результате их взаимодействия с электронами, испускаемыми катодом или накаленной спиралью, происходит ионизация молекул остаточных газов. Получающиеся при этом положительные ионы компенсируют пространственный заряд выходящих из катода электронов, изменяя распределение потенциала между катодом и анодом электронной лампы, вследствие чего меняются ее характеристики и параметры.

Поскольку давление газа в плохо откачанном или плохо обезгаженном электронном приборе никогда не остается постоянным, то это вызывает непостоянство характеристик прибора. Кроме того, в связи с тем что ионизация газов и движение ионов являются статическими процессами, то даже при постоянстве давления в электронной лампе количество образующихся ионов в различные моменты времени может колебаться во времени, что является причиной дополнительных шумов при работе лампы в приемном устройстве. Образующиеся в электронной лампе положительные ионы, попадая на находящуюся под отрицательным потенциалом сетку, создают сеточный ток, в результате чего

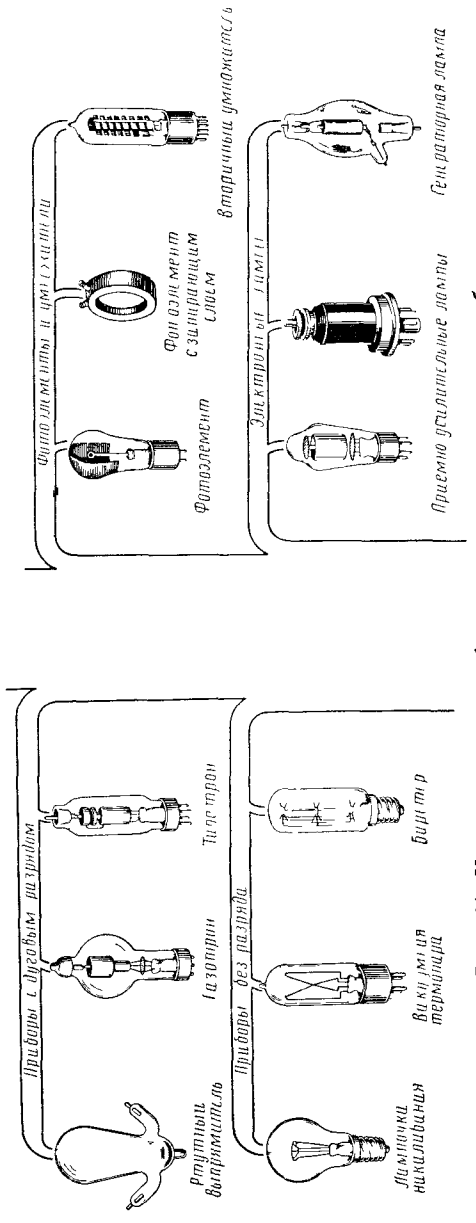
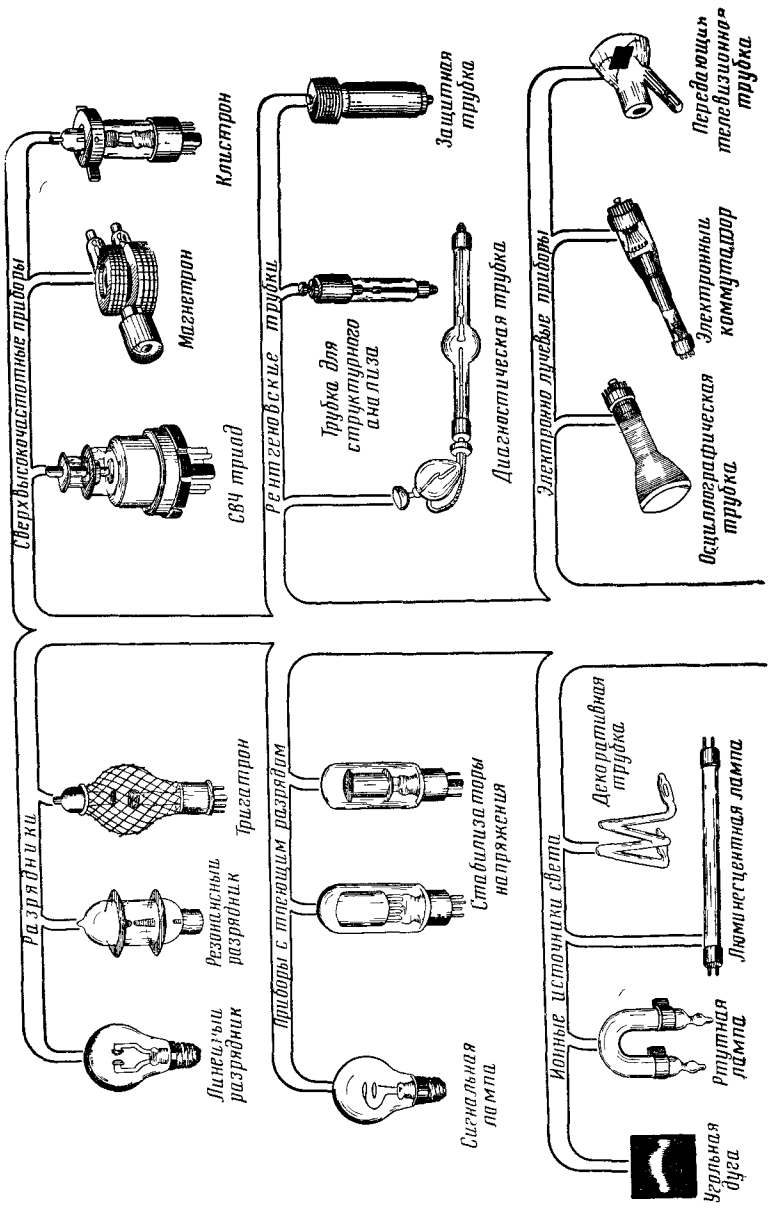


Рис 41 Упрощенная классификация электровакуумных приборов

возникают различного рода искажения усиливаемых сигналов. В различного рода высоковольтных электронных приборах (кенонах, рентгеновских и электронно-лучевых трубках, мощных генераторных лампах и др.), увеличение давления газа понижает пробивное напряжение, вследствие чего прибор может выйти из строя.

Повышение давления газа в электронной лампе до 10^{-3} мм рт. ст. и выше и происходящее при этом увеличение анодного тока вызывает перегрев электродов лампы, при этом из них выделяются все новые и новые порции газа. Анодный ток при этом резко нарастает, в лампе образуется концентрированный дуговой разряд, приводящий к расплавлению электродов и гибели лампы.

Аналогичный пробой может произойти в вакуумной лампе накаливания при достаточно большом напряжении на концах спирали и при давлении больше 10^{-3} мм рт. ст. В результате этого концы спирали и токоподводящих электродов могут сильно разогреться и даже расплавиться, и лампа может выйти из строя.

Не менее важное значение имеет предварительная тщательная откачка приборов, работающих с газовым наполнением (тиратроны, игнитроны, газотроны, газосветные лампы и др.), поскольку наличие малейших посторонних газообразных примесей к основному газу-наполнителю может сильно изменить установленный потенциал зажигания, обратное пробивное напряжение, падение напряжения между электродами, а в газосветных лампах — характер и цвет свечения.

В тщательной откачке нуждаются также электровакуумные приборы с холодными катодами (газосветные лампы, разрядники, специальные конструкции ионных приборов). Если в приборе используются электронные явления, то количество присутствующих в нем положительных ионов должно быть незначительно, чтобы не вызвать искажений в работе прибора, а это значит, что в приборе должен быть обеспечен высокий вакуум.

Качественная обработка поверхности катодов, имеющая исключительно важное значение для обеспечения нормальной работы приборов с холодными катодами, может быть произведена только в условиях высокого вакуума.

Что касается газоразрядных приборов с холодными катодами, то одним из главнейших условий их работы является присутствие в рабочем объеме прибора вполне определенных газов, находящихся при определенном давлении. Недопустимость присутствия в приборе посторонних примесей требует предварительного удаления из него атмосферного воздуха и тщательного обезгаживания внутренней арматуры.

В массовом производстве осветительных ламп, а так же различных типов электровакуумных приборов, к которым в первую очередь относятся электронные лампы, применяются специальные откачные автоматы, представляющие собой высокопроизводительные машины карусельного типа.

Откачные автоматы предназначены для быстрой откачки приборов, имеющих, как правило, небольшой разрежаемый объем. Откачной автомат с неподвижными насосами (рис. 42) обычно имеет подвижную вращающуюся часть (карусель), на одной из позиций которой еще только устанавливается очередная лампа для откачки, а в то же время на другой позиции уже отплавляется откачанная лампа. Окончательная доводка ламп до требуемого вакуума производится путем распыления газопоглотителя на последних позициях автоматов откачки или же за счет распыления газопоглотителя в отпаянной лампе.

Основной деталью откачного автомата является золотник, состоящий из двух массивных частей: неподвижного диска 1, который жестко скреплен со станиной автомата и подвижного диска 2, связанного с вращающейся при работе автомата каруселью 3.

Прилегающие друг к другу плоскости подвижного и неподвижного золотниковых дисков пришлифованы и между ними имеются канавки, заполненные касторовым маслом, поступающим из специальной масленки. Масло обеспечивает, с одной стороны, смазку трущихся поверхностей, а с другой стороны создает уплотнение между подвижным и неподвижными золотниковыми дисками.

По окружности карусели 3 расположены гнезда 4, в которые вставляются откачиваемые приборы. Каждое гнездо с помощью съемной трубки соединено с патрубком 5 подвижного диска. В толще подвижного и неподвижного дисков имеются каналы, выходящие наружу в виде патрубков 6, к которым присоединены впускные патрубки вакуумных насосов или подводка, через которую осуществляется наполнение прибора газом после его предварительной откачки.

На рис. 43 показана система соединений от лампы до насоса. У всех автоматов откачки вращение верхнего подвижного золотникового диска происходит с перерывами, приходящимися на момент совпадения отверстий обоих дисков, в течение которого происходит откачка прибора.

Во время перехода с одной позиции на другую прибор изоли-

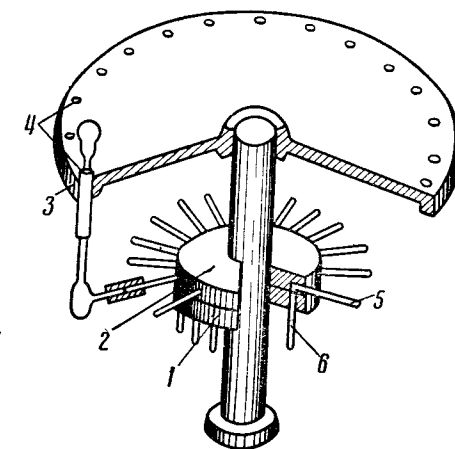


Рис. 42. Устройство откачного автомата с неподвижными насосами: 1 — неподвижный золотниковый диск, 2 — подвижный золотниковый диск, 3 — карусель, 4 — гнездо, 5 — патрубок подвижного золотникового диска, 6 — патрубок неподвижного золотникового диска

рован от подводок, связанных с неподвижным диском. Перейдя вместе с каруселью на следующую позицию, он снова становится связанным, но уже с новым отверстием неподвижного диска, а следовательно, с новым пароструйным или вращательным насосом. В течение откачного цикла прибор, таким образом, побывает последовательно на всех позициях откачного автомата, после чего отпайвается газовой горелкой.

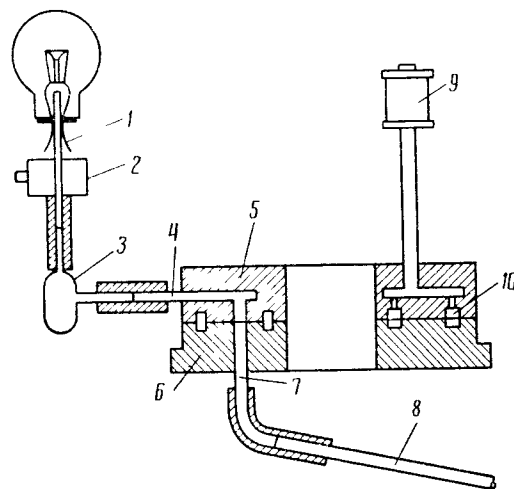


Рис. 43. Система соединений от лампы до насоса:

1 — откачная трубка (штенгель) лампы, 2 — гнездо карусели, 3 — стеклянный соединитель, 4 — патрубок подвижного золотникового диска, 5 — подвижный золотниковый диск, 6 — неподвижный золотниковый диск, 7 — патрубок неподвижного золотникового диска, 8 — трубка для присоединения к насосу, 9 — масленка, 10 — канавки для масла

На быстроходных автоматах новейшей конструкции автоматизирована не только заварка, откачка и клеммирование колб, но и сам процесс загрузки ножек и колб, а также перенос ламп с последней позиции заварки на первую позицию откачки. Эти автоматы чаще всего изготавливаются с раздельными каруселями заварки и откачки, вращающимися от общего привода.

В обязанность работницы, обслуживающей такой автомат, входит наблюдение за ходом технологического процесса, а также загрузка колб в конвейер, из которого они автоматически поступают в специальные шаблоны, расположенные на заварочной карусели.

Пройдя цикл заварки и откачки, лампы сбрасываются на транспортер, по которому они поступают к автомату цоколевки.

Для улучшения вакуума в осветительной лампе до ее отпайки

Что касается типов насосов, применяемых в откачном автомате, то они выбираются в зависимости от давления, которое требуется получить в отпаянной лампе. Так, например, для откачки ламп накаливания нет необходимости в применении пароструйных насосов, поскольку отпайка этих ламп производится при давлении около $3 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., которое легко может быть получено при использовании одних только вращательных насосов. Производительность заварочно-откачных автоматов, применяемых в производстве осветительных ламп — несколько тысяч ламп в час.

на спираль предварительно наносится красный фосфор. После отпайки лампы подается напряжение на спираль, спираль накаляется и нанесенный на нее красный фосфор переходит из твердого состояния в газообразное. Испаряясь со спирали, красный фосфор вступает во взаимодействие с остаточными газами, образуя бесцветный прозрачный налет на внутренних стенках колбы. Помимо красного фосфора на спираль наносится криолит, который при температуре 1000° испаряется и оседает на колбе также в виде бесцветного налета. В процессе эксплуатации осветительной лампы криолит образует с распыляющимся вольфрамом слабоокрашенное фтористое соединение, препятствующее почернению колбы, что значительно увеличивает срок службы осветительной лампы.

Для откачки приемно-усилительных ламп на откачных автоматах помимо вращательных насосов применяются также пароструйные насосы.

На первых позициях автомата откачка осуществляется только вращательными насосами, пароструйные насосы обычно ставятся на последних 5—6 позициях автомата, где производится обезгаживание аппаратуры и распыление газопоглотителя.

Первоначально из прибора с помощью вакуумных насосов удаляют основную массу воздуха, после чего обычно производится вакуумная обработка деталей прибора. Для удаления влаги и газов, адсорбированных на внутренней поверхности стеклянной колбы, ее прогревают в электрической печи под непрерывной откачкой. После этого приступают к обезгаживанию металлических деталей, находящихся внутри прибора.

В зависимости от конструкции и назначения деталей их нагревают с помощью различных приемов. Пропрев или прокаливание нитей, спиралей, а также катодов производят путем непосредственного пропускания через них электрического тока. Наиболее крупные детали электровакуумных приборов (чаще всего аноды) нагреваются в процессе непрерывной откачки токами высокой частоты. При этом за счет теплоизлучения от накаливаемого анода прогреваются также и другие электроды.

В том случае, когда необходимо обеспечить эффективное обезгаживание не только анода, но и всех других внутренних электродов ламп, применяют электронную бомбардировку. Для этого на прогреваемые электроды подается положительный по отношению к катоду потенциал. Испускаемые катодом электроны ударяются о поверхность этих электродов, их кинетическая энергия превращается при этом в тепловую, вследствие чего резко увеличивается температура поверхности электродов. Для того чтобы при этом прокаливаемые электроды не расплавились, а также для того чтобы вакуумные насосы успевали удалять выделяющиеся в процессе обезгаживания газы, применяют кратковременное включение и выключение напряжения, подаваемого на прокаливаемые электроды.

После обезгаживания внутренней арматуры продолжается откачка приборов до тех пор, пока в них не будет достигнуто требуемое давление. После этого вакуумные приборы обычно отпайваются от откачной установки, а в ионные приборы перед отпайкой напускается определенное количество какого-либо инертного газа (или их смеси).

Помимо применения откачных автоматов, у которых пароструйные и вращательные насосы неподвижны, а подсоединение

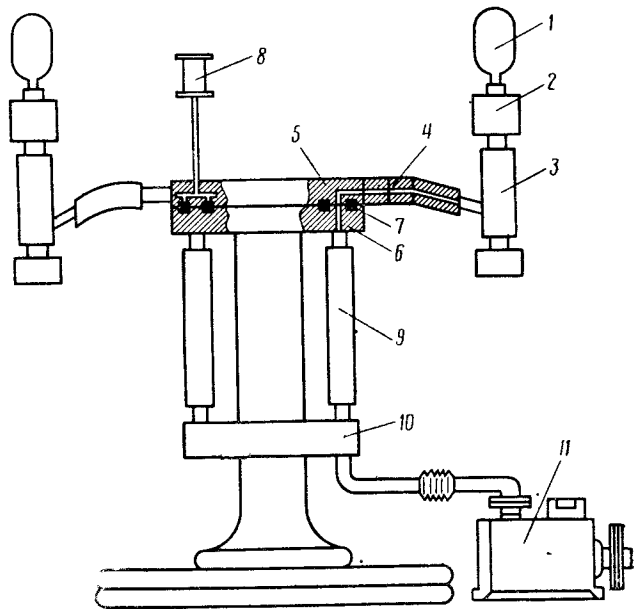


Рис. 44. Устройство откачного автомата с подвижными пароструйными насосами:

1 — откачиваемая лампа, 2 — гнездо, 3 — пароструйный насос, 4 — трубопровод, 5 — подвижный золотниковый диск, 6 — неподвижный золотниковый диск, 7 — канавки для масла, 8 — масленга, 9 — трубопровод, 10 — коллектор, 11 — вращательный насос

откачиваемого прибора к той или иной позиции откачного автомата осуществляется с помощью золотника, установленного в высоковакуумной части системы, за последнее время все шире начинают применяться автоматы с подвижными пароструйными насосами. Устройство такого автомата показано на рис. 44.

Откачиваемая лампа 1 вставляется своей откачной трубкой (штенгелем) в гнездо 2. Непосредственно с гнездом связан пароструйный насос 3, который вращается вместе с каруселью откачного автомата. Вследствие этого откачка каждого прибора в течение всего откачного цикла (полного оборота карусели) производится одним и тем же пароструйным насосом.

Поскольку между откачиваемой лампой и впускным патрубком пароструйного насоса нет никакого зажима, вентиля или крана, а золотниковое устройство перенесено в низковакуумную коммуникацию, то эффективная быстрота откачки и предельный вакуум такого автомата значительно выше, чем у автомата с неподвижными насосами. Однако, так как при замене откачиваемого прибора в нагретый пароструйный насос каждый раз, хотя и на короткое время, врывается атмосферный воздух, то в качестве рабочей жидкости здесь обязательно приходится применять специальные силиконовые масла, допускающие длительный контакт в кипящем состоянии с атмосферным воздухом.

Для откачки крупных электровакуумных приборов (например электронно-лучевых трубок) применяются автоматы, в которых подвижными являются не только пароструйные, но и вращательные масляные насосы.

Для индивидуальной длительной и тщательной откачки одного или нескольких приборов в лабораторной практике, а иногда и в производственных условиях, применяют откачные посты. Схема

устройства откачного поста, предназначенного для откачки приборов с последующим их наполнением инертным газом, показана на рис. 45.

Сверху откачного поста имеется вилка 1 с напаянными на нее для откачки приборами 2. К трубопроводу, соединяющему вилку с высоковакуумным насосом, присоединен ионизационный или термометрический манометр 3, измеряющий давление в вакуумной системе. С другой стороны трубопровода имеется отрезок 4, предназначенный для дутья при напайке приборов. Вакуумный пост имеет четыре стеклянных крана. Первый кран 5 предназначен для отсоединения откачиваемых приборов от пароструйного насоса 6. Второй кран 7 предназначен для разобщения пароструйного 6 и

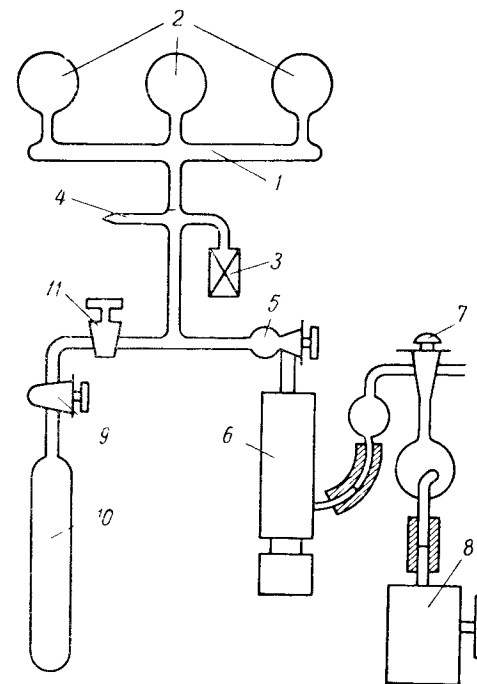


Рис. 45. Схема откачного поста:

1 — вилка, 2 — откачиваемые приборы, 3 — манометр, 4 — отрезок для дутья, 5, 7, 9, 11 — краны, 6 — пароструйный насос, 8 — вращательный насос, 10 — баллон

вращательного насоса, а также для напуска во вращательный насос атмосферного воздуха после его остановки, что необходимо для предотвращения засасывания масла из вращательного насоса в вакуумную систему. Третий кран 9 предназначен для впуска газа из баллона 10 в прибор после их предварительной откачки. Обычно для точной дозировки количества напускаемого газа около этого крана ставится еще один кран 11. Пространство между этими двумя кранами тщательно откачивается. Перед наполнением откаченных приборов газом кран 11 закрывается, открывается кран 9 и сперва наполняется газом небольшое пространство между кранами 9 и 11. Затем кран 9 закрывается и открывается кран 11, откуда газ в нужном количестве поступает в приборы.

Кроме большого числа различных запаянных электровакуумных приборов, существуют разборные электровакуумные приборы, работающие в условиях непрерывной откачки.

К числу таких приборов в первую очередь относятся разборные генераторные триоды, используемые на передающих радиостанциях, а также в генераторах высокой частоты.

Общий вид агрегата с генераторным триодом РГМ-500, установленного на специальной тележке вместе с высоковакуумным пароструйным насосом, показан на рис. 46.

Корпус триода 1 выполнен в виде пустотелого цилиндра, состоящего из медных фланцев, имеющих форму плоских колец с водяным охлаждением, отделенных друг от друга полыми цилиндрическими кварцевыми изоляторами.

Анод лампы 2 выполнен в виде медного полого цилиндра, нижняя часть которого заканчивается медным фланцем. На анод одевается рубашка водяного охлаждения. Герметичное соединение анода с корпусом триода осуществляется за счет разборного уплотнения из кольцевой вакуумной резины. Использование такого рода уплотнения обеспечивает возможность быстрой разборки триода для замены катода и его последующей сборки.

На верхней плите 3 тележки установлен переходной фланец, к которому сверху примыкает корпус лампы, а снизу герметично присоединен высоковакуумный пароструйный насос 4. На выходном фланце этого насоса установлен вакуумный клапан 5 сифонного типа, через который выпускной патрубок высоковакуумного насоса присоединяется к линии предварительного разрежения, на конце которой установлен вращательный насос.

Тележка 6 служит для того, чтобы закатывать агрегат внутрь ламповой кабины шкафа высокочастотного генератора.

К числу разборных электровакуумных приборов, работающих в условиях непрерывной откачки, относятся также металлические ртутные выпрямители, используемые для преобразования переменного тока в постоянный.

Ртутный выпрямитель представляет собой ионный прибор,

использующий мощный дуговой разряд в парах ртути. В качестве катода, который является источником электронов, в ртутном выпрямителе используется металлическая ртуть, имеющая неограни-

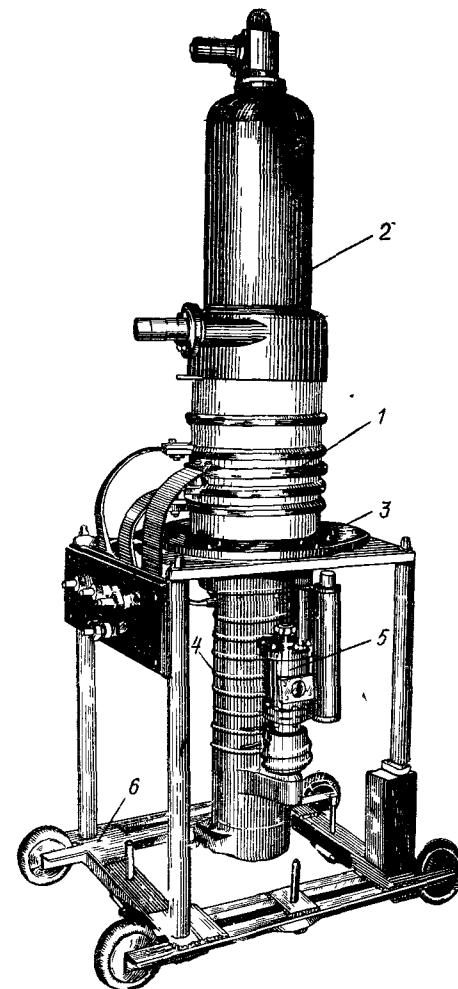


Рис. 46. Разборный генераторный триод с непрерывной откачкой.

1 — корпус триода, 2 — анод, 3 — верхняя плита тележки, 4 — пароструйный насос, 5 — вакуумный клапан, 6 — тележка

ченную эмиссию и практически неограниченную долговечность, так как испаряющаяся с поверхности катода в процессе работы ртуть конденсируется на охлаждаемых проточной водой или маслом стенках холодильника и стекает обратно к катоду. Для того

чтобы использовать ртутные выпрямители для преобразования многофазных токов, их часто делают многоанодными (число рабочих анодов доходит до 12). При этом дуга в приборе горит между катодом и тем из анодов, на котором в данный момент имеется наивысший положительный потенциал.

На рис. 47 схематически изображен металлический ртутный выпрямитель с двумя рабочими анодами. Здесь 1 — ртутный катод; 2 — анод зажигания, расположенный в непосредственной близости от катода и служащий для запуска ртутного выпрямителя; 3 и 4 — аноды возбуждения (дежурные аноды), служащие для поддержания дуги в приборе при выключении нагрузки; 5 и 6 — рабочие аноды, размещенные в анодных рукавах выпрямителя.

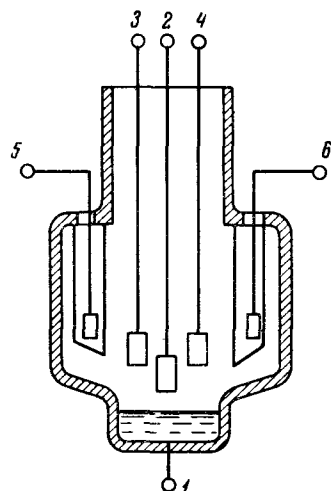


Рис. 47. Схема устройства ртутного выпрямителя:

1 — ртутный катод, 2 — анод зажигания, 3 и 4 — аноды возбуждения, 5 и 6 — рабочие аноды

Для зажигания дуги в ртутном выпрямителе производят замыкание цепи зажигания с ртутью катода.

Поскольку к анодам возбуждения при этом подведено переменное напряжение, то дуга сейчас же переходит на один из этих анодов, находящихся в данный момент под положительным потенциалом. Когда подается переменное напряжение на рабочие (главные) аноды, то дуга перебрасывается на тот из них, который в данный момент времени имеет наиболее положительный по отношению к катоду потенциал.

Поскольку в процессе работы выпрямителя потенциал каждого из рабочих анодов непрерывно изменяется в зависимости от частоты приложенного переменного тока, то дуга перебрасывается поочередно на остальные рабочие аноды.

Для обеспечения надежной работы металлического ртутного выпрямителя необходимо непрерывно поддерживать в нем требуемую степень рабочего разрежения (порядка 10^{-5} мм рт. ст.). Так как полной газонепроницаемости и полного обезгаживания деталей в разборных выпрямителях получить невозможно, то обычно каждый выпрямитель снабжается своей вакуумной установкой.

На рис. 48 показан внешний вид ртутного выпрямителя, используемого для дальних передач постоянного тока высокого напряжения. Откачная система выпрямителя состоит из двух насосов: парортутного вакуумного насоса 1, создающего внутри выпрямителя разрежение до 10^{-5} мм рт. ст., и вращательного вакуумного насоса предварительного разрежения 2.

В качестве уплотнителей в ртутных выпрямителях применяются шайбы, кольца и трубки из специальной резины. В тех узлах, которые работают при повышенной температуре, резиновые шайбы армируются стальными обжимками.

С целью повышения термостойкости прокладок в настоящее время для их изготовления все шире начинают применять кремний-органическую резину, которая допускает нагрев до $150-200^{\circ}$. Кроме того, широкое применение находят металлические прокладки из алюминиевой проволоки, покрываемые сверху лаком для предохранения алюминия от воздействия ртути.

2. Электронный микроскоп

За последние годы в научных исследованиях широкое применение получил электронный микроскоп, полезное увеличение которого примерно в 100 раз больше, чем у светового микроскопа, и достигает 50 000 раз. Разрешающая способность, получаемая с помощью электронного микроскопа — проектора, достигает 2—3 ангстрем (ангстрем = 10^{-8} см).

Электронный микроскоп дает возможность наблюдать отдельные крупные молекулы, коллоиды, вирусы, элементы кристаллической решетки и другие объекты, не поддающиеся исследованию с помощью светового микроскопа.

Электронный микроскоп обычно представляет собой металлическую разборную трубку, находящуюся под непрерывной откачкой. В нем имеется катод, являющийся источником электронов, и фокусирующая система, позволяющая концентрировать электронный поток на изучаемом объекте, который помещается на пути движения электронов. Система магнитных или электростатических линз позволяет получить сильно увеличенное изображение объекта на флуоресцирующую

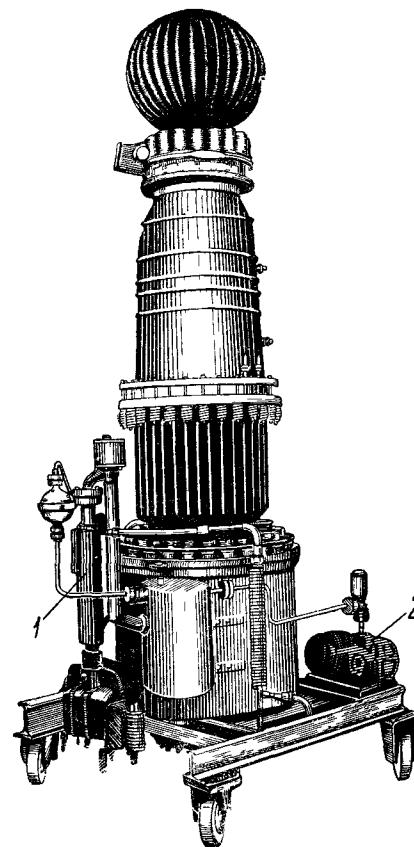


Рис. 48. Внешний вид ртутного выпрямителя:

1 — парортутный вакуумный насос, 2 — вращательный вакуумный насос

щем экране или на фотопластинке В зависимости от способа наблюдения увеличенных изображений объектов с помощью применения электроннооптических устройств существует несколько типов электронных микроскопов:

1. Просвечивающий электронный микроскоп (наблюдение осуществляется в проходящем потоке электронов, которые пронизывают объект).

2. Отражательный электронный микроскоп (наблюдение осуществляется в отраженном потоке электронов).

3. Эмиссионный электронный микроскоп (наблюдение осуществляется за счет собственного электронного излучения).

4. Растровый электронный микроскоп (наблюдение осуществляется с помощью развертки элементов объекта специальным электронным зондом).

5. Теневой электронный микроскоп (в котором наблюдаются увеличенные теневые изображения объекта).

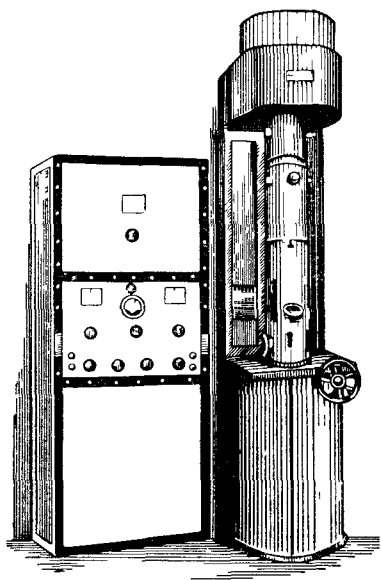


Рис 49 Внешний вид магнитного электронного микроскопа

В настоящее время наиболее широкое распространение получил магнитный электронный микроскоп просвечивающего типа. Внешний вид такого микроскопа конструкции Государственного оптического института изображен на рис. 49 (в стоящем слева шкафу смонтирован блок питания микроскопа). В этом микроскопе изображение объекта создается электронами, проходящими сквозь объект, а в качестве линз используются либо магнитные катушки с полюсными наконечниками, либо постоянные магниты.

На рис. 50 показана принципиальная схема магнитного электронного микроскопа просвечивающего типа. Сверху микроскопа находится «электронная пушка», состоящая из катода 1, фокусирующего электрода 2 и анода 3. Между катодом и анодом приложена большая разность потенциа-

лов (от 30 до 100 кВ в зависимости от конструкции микроскопа), причем анод заземляется. Выходящий из «пушки» поток быстрых электронов фокусируется конденсорной линзой 4, проходит сквозь исследуемый объект 5 и попадает в объективную линзу 6. Объективная линза создает первое промежуточное изображение 7. Для наблюдения промежуточного изображения в этой плоскости помещают флуоресцирующий экран. Электроны, попадая на флуорес-

цирующий экран, вызывают его свечение, благодаря чему невидимое электронное изображение превращается в видимое, световое. В центре экрана имеется небольшое отверстие. Электроны, создающие изображение, проходят сквозь него и попадают в проекционную линзу 8, которая создает второе увеличенное изображение 9, являющееся конечным. Конечное изображение становится видимым благодаря помещенному здесь второму флуоресцирующему экрану. Для фотографирования конечного изображения под флуоресцирующим экраном помещается фотографическая пластинка 10. В момент экспонирования флуоресцирующий экран убирается, и электроны, попадая непосредственно на фотопластинку, вызывают ее очувствление.

Для увеличения контрастности изображения применяются диафрагмы 11 и 12.

Число фокусирующих линз в некоторых микроскопах доводится до трех и даже до пяти, что дает возможность значительно повысить создаваемое микроскопом увеличение.

Узлы микроскопа, показанные на рис. 50, объединяются в одну общую конструкцию, которая называется колонной микроскопа. Внутри колонны, имеющей объем 5—15 л, обычно поддерживается вакуум порядка 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст. Качество работы микроскопа в значительной степени определяется его вакуумной системой.

Типичная вакуумная система для откачки электронного микроскопа показана на рис. 51. К колонке микроскопа 1 через сильфон присоединен входной патрубок 2 клапанного устройства.

К левому отсеку 3 клапанной коробки через маслоотражатель 4 присоединен паромасляный насос 5. Выпускной патрубок паромасляного насоса через сильфон 6 присоединен к правому отсеку 7 клапанной коробки. Верхняя часть правого отсека клапанной коробки через трубопровод 8 и сильфоны присоединена к выпускному патрубку вращательного масляного насоса 9.

С помощью клапанной коробки осуществляется переключение колонны микроскопа либо на откачку вращательным насосом с целью получения в ней предварительного вакуума, либо на откачку паромасляным насосом для создания в ней требуемого рабочего разрежения. На рис. 51 стрелками показан ход откачки

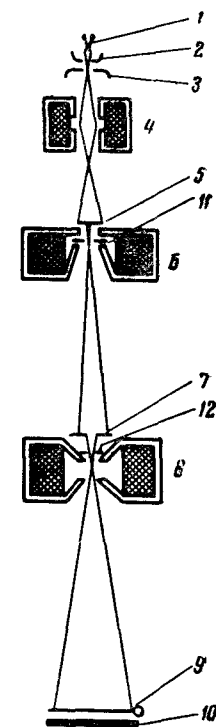


Рис. 50 Схема магнитного электронного микроскопа просвечивающего типа

1 — катод, 2 — фокусирующий электрод, 3 — анод, 4 — конденсорная линза, 5 — исследуемый объект, 6 — объективная линза, 7 — промежуточное изображение, 8 — проекционная линза, 9 — конечное изображение, 10 — фотопластинка, 11 и 12 — диафрагмы

микроскопа при одновременной последовательной работе паромасляного и вращательного насосов.

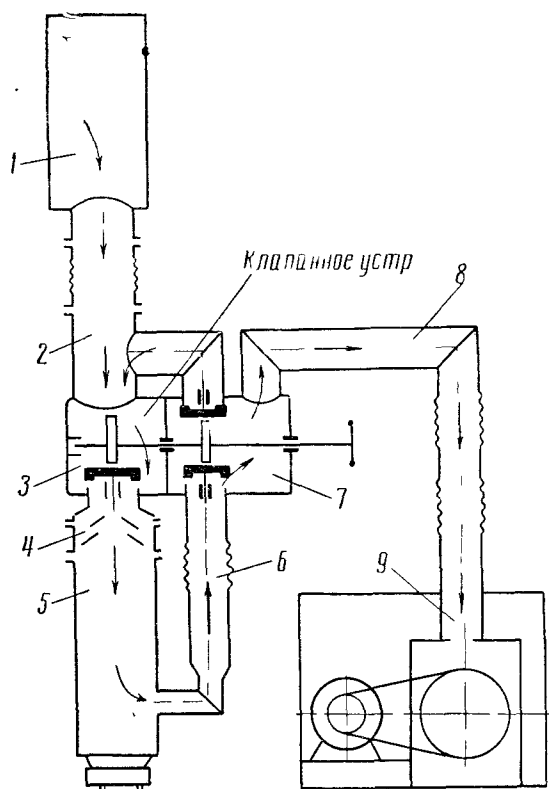


Рис. 51. Вакуумная система электронного микроскопа:

1 — колонка микроскопа, 2 — входной патрубок клапанного устройства, 3 — левый отсек клапанной коробки, 4 — маслоотражатель, 5 — паромасляный насос, 6 — сильфон, 7 — правый отсек клапанной коробки, 8 — трубопровод, 9 — масляный вращательный насос

3. Плавка и спекание металлов в вакууме

Одним из методов получения высококачественных металлов является вакуумная плавка. При этом получается чистый плотный металл, почти не содержащий окисей и газов. Удаление растворенных газов способствует повышению механических, физических и электрических свойств металла. Кроме того, плавка в вакууме проводится при более низких температурах, чем плавка при атмосферном давлении.

В настоящее время вакуумная плавка применяется для полу-

чения различных сортов железа с малым содержанием углерода (железо армко, трансформаторное и др.), для производства некоторых сортов специальных сталей с пониженным содержанием водорода и азота, производства жаропрочных сталей, никеля и устойчивых против коррозии сплавов на никелевой основе, производства бескислородной высокоэлектропроводной меди и сплавов меди с тугоплавкими и редкими металлами. Вакуумная плавка применяется также для производства заготовок из тугоплавких редких металлов: бериллия, молибдена, вольфрама, титана и циркония.

Для вакуумной плавки металлов чаще всего используются печи с индукционным нагревом, при котором тепло развивается в самом нагреваемом металле, что обеспечивает высокий термический к. п. д. печи. При использовании высокочастотного нагрева в печи может быть получена высокая температура, а сам процесс плавки поддается автоматическому управлению. Бессердечниковая индукционная печь достаточно проста по устройству, однако требует для своей работы весьма дорогой и сложной электрической установки — высокочастотного генератора.

Нагрев металла токами высокой частоты существенно зависит от формы, размеров и способа укладки его кусков в тигель. Чем меньше куски, тем меньше поглощают они энергии высокочастотного электромагнитного поля и тем меньше тепла в них выделяется. По этой причине плавка порошковых металлов, а также мелкозернистых металлов при обычно применяемых частотах тока практически невозможна. В том случае, когда электромагнитное поле не пронизывает насквозь куски нагреваемого металла, внутренние его части прогреваются за счет теплопередачи от нагретых до высокой температуры наружных слоев, что замедляет процесс плавки, увеличивает потери тепла и расход электроэнергии. Поэтому правильный выбор частоты тока имеет первостепенное значение для обеспечения эффективной плавки. Что касается самого индуктора, то он может быть помещен как в вакуумном пространстве (рис. 52, а), так и снаружи его (рис. 52, б). В первом случае уменьшается расстояние между индуктором и нагреваемым металлом, в результате чего сокращается расход затрачиваемой на плавку электроэнергии, однако при этом необходима хорошая изоляция витков индуктора для предупреждения возникновения электрического разряда между ними в вакууме. Во втором случае катушка индуктора навита снаружи на керамический стакан и между витками индуктора не нужна особая изоляция, поскольку они находятся при атмосферном давлении. Однако при такой конструкции вследствие значительного зазора между нагреваемым металлом и индуктором резко возрастает рассеяние магнитного потока индуктора и снижается электрический к. п. д. печи. Но вместе с тем печи с внешним индуктором очень просты по устройству и удобны в работе. Объем откачиваемого пространства у них сравнительно невелик, след-

ствие чего сокращается время, потребное для достижения рабочего разрежения.

Для того чтобы сохранить основные преимущества вакуумной плавки, слив металла из плавильного тигля в изложницу или в форму также производят в вакууме, применяя для этой цели различные способы (поворачивая плавильный тигель внутри неподвижного кожуха печи или же поворачивая всю печь).

Тугоплавкие и порошковые металлы чаще всего плавят в вакуумных печах сопротивления, имеющих по сравнению с высокочастотными печами значительно более простое электрооборудо-

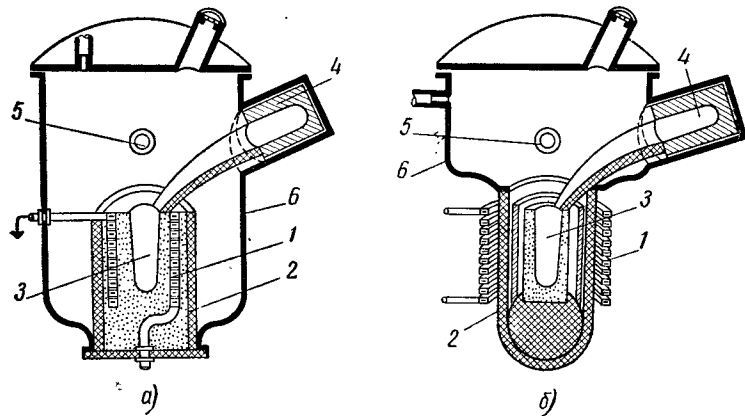


Рис. 52. Устройство вакуумных индукционных высокочастотных печей:

а — с индуктором внутри печи, *б* — с внешним индуктором: 1 — индуктор, 2 — керамическая труба, 3 — плавильный тигель, 4 — изложница, 5 — полая ось, соединяемая трубопроводом с вакуумным насосом, 6 — кожух

вание. В качестве нагревателей в этих печах обычно используются стержни или трубы, изготовленные из угля, графита, корборунда (силита) или же из тугоплавких металлов. Кроме того, для плавки таких металлов, как молибден, вольфрам, титан и цирконий, применяются дуговые вакуумные печи.

На рис. 53 показана дуговая вакуумная печь, используемая для плавки небольших количеств молибдена. Опорная плита 1 и корпус печи 7 изготовлены из меди и охлаждаются проточной водой. Подвод тока к печи осуществляется через охлаждаемый водой медный электрод 6, к которому с помощью муфты 4 прикреплен молибденовый наконечник 8. Перемещение электрода в вертикальном направлении осуществляется с помощью роликов 5. Второй токоподводящий конец 2 прикреплен к заземленной опорной плите 1. На выступ опорной плиты укладывают кусок молибдена 10, чтобы предотвратить приваривание к меди образующегося в процессе плавки молибденового слитка 9. После сборки печи на ее дно укладывают небольшое количество дробленого молиб-

денового спека. Подача в тигель дробленого молибдена осуществляется при помощи вибрационного питателя, устанавливаемого на фланце корпуса печи (вибрационный питатель на рисунке не показан). Плавка молибдена производится при разрежении порядка 10^{-4} мм рт. ст. После плавки слиток охлаждается в печи под вакуумом. Полученный таким путем молибден пластичнее, чем спеченный или плавильный при большом остаточном давлении. Он лучше поддается ковке и другим видам обработки давлением.

В настоящее время для изготовления электровакуумных приборов широко применяют такие металлы, как тантал, ниобий, титан, цирконий и чистое железо, получаемые спеканием в вакууме спрессованных заготовок (штабиков) из порошков этих металлов.

Большая удельная поверхность порошков обуславливает сильное поглощение ими газов, которые затем интенсивно выделяются при нагревании заготовок. Возрастание давления газов, заключенных в порах, в процессе спекания заготовок при атмосферном давлении в отдельных случаях может привести к полному их разрушению. Эти явления не устраняются даже в том случае, если производить спекание в защитной атмосфере, например, водорода или окиси углерода, поскольку эти газы сами сорбируются, а водород, кроме того, образует пары воды, восстанавливая окислы на поверхности или внутри зерен.

При спекании в вакууме газы из заготовок удаляются гораздо легче и при меньшем нагреве. Вакуум не только защищает порошковые металлы от взаимодействия с воздухом, но в то же время способствует восстановлению окислов как под действием примеси углерода, содержащегося в некоторых порошках, так и под влиянием водорода, поступление которого в рабочем пространстве печи легко регулировать натекателем. Кроме того, вакуум способствует испарению летучих примесей, содержа-

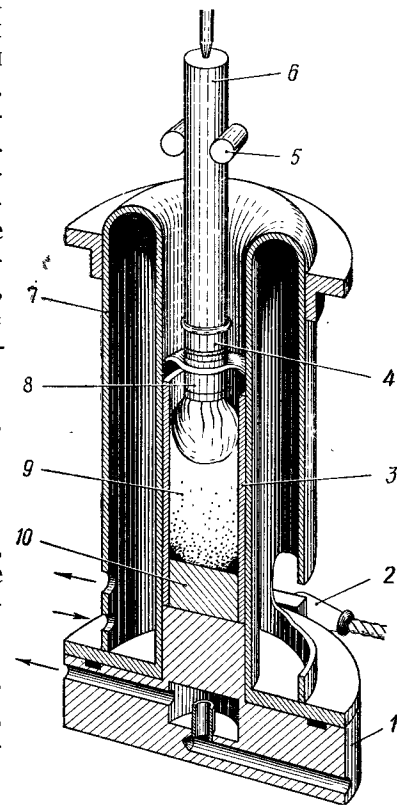


Рис. 53. Дуговая вакуумная печь:

1 — опорная плита, 2 — подвод тока, 3 — экраны из листового молибдена, 4 — муфта, 5 — ролик, 6 — медный электрод, 7 — корпус печи, 8 — молибденовый наконечник, 9 — молибденовый слиток, 10 — кусок молибдена

щихся во многих порошковых металлах. Спекание в вакууме применяется в порошковой металлургии для получения чистых металлов, сплавов для постоянных магнитов, магнитомягких материалов, тугоплавких металлов и различных металлокерамических изделий

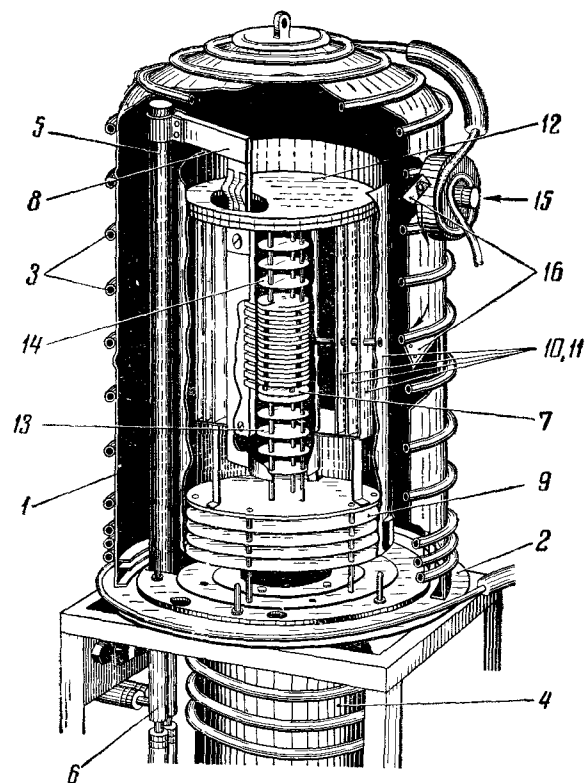


Рис 54. Вакуумная печь сопротивления:
1 — корпус печи, 2 — опорная плита, 3 — змеевик, 4 — пароструйный насос, 5 — медные трубы для ввода тока, 6 — водяное охлаждение, 7 — электронагреватель, 8 — шина, 9—14 — экраны, 15 — глазок, 16 — зеркала

Для спекания заготовок металлокерамических изделий может быть использована вакуумная печь сопротивления с молибденовыми нагревателями, изображенная на рис. 54. Корпус 1 печи представляет собой стальной колокол, охлаждаемый проточной водой, циркулирующей в наваренном на нем змеевике 3. Колокол ставят на опорную плиту 2, на которой имеется уплотняющая прокладка из вакуумной резины. Снизу к опорной плите непосредственно примыкает впускной патрубок пароструйного насоса 4. Остаточное давление в печи при отсутствии натекания составляет $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Ввод тока через опорную плиту

осуществляется с помощью медных труб 5, которые одновременно являются держателями для всего электронагревателя 7, состоящего из 10 молибденовых полосок. Для уменьшения тепловых потерь нагреватель снабжен системой экранов 9—14.

Молибденовый нагреватель допускает длительную работу при 1800° , а кратковременный нагрев до 2150° . Если нужна большая рабочая температура, то нагреватель делают из тантала или вольфрама. Во избежание возникновения дугового разряда напряжение на нагревателе обычно не превышает 30 в.

4. Металлизация в вакууме

В настоящее время вакуум находит широкое применение для нанесения тонких металлических пленок на различные поверхности. Наиболее простым способом нанесения тонких пленок является осаждение паров металла за счет конденсации на предназначенной к покрытию поверхности.

Таким способом, например, стекло можно покрывать пленками алюминия, магния, меди, серебра, золота, платины, железа, никеля, хрома и других металлов.

Устройство для испарения металлов в вакууме показано на рис. 55. Оно состоит из металлической камеры с латунным экраном 2 и съемной крышкой 1. Внутри камеры находится нагревательный элемент 4 в виде вольфрамовой спирали, к которой подводится электрический ток. Испаряемый металл в виде небольших кусочков помещается в нагревательный элемент. В том случае, если испаряемый металл плохо смачивает вольфрамовую нить, его иногда наносят на нее электролитическим способом.

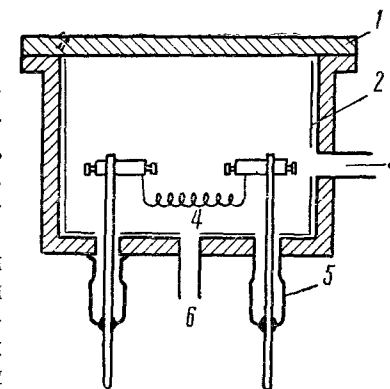


Рис. 55. Устройство для испарения металлов в вакууме

1 — съемная крышка, 2 — латунный экран, 3 — трубопровод для присоединения к вакуумному насосу, 4 — нагревательный элемент, 5 — спай меди со стеклом и вводами из вольфрамовой проволоки, 6 — трубопровод для присоединения манометра

Металлизируемые предметы размещаются по кругу у стенок камеры на расстоянии нескольких сантиметров от нагревательного элемента, съемная крышка герметично закрывается и камера откачивается до давления порядка нескольких микрон. После этого подается напряжение на нагревательный элемент и производится кратковременный прогрев испаряемого металла до температуры плавления. Эта операция необходима для удаления растворенных в металле газов, особенно в случае серебра, которое легко поглощает кислород. Начало плавления металла

и выход из него растворенных газов могут быть обнаружены по колебанию тока накала спирали нагревательного элемента, а также по возрастанию давления в рабочем объеме камеры.

Сразу же после удаления выделившихся газов снова включается нагревательный элемент и металл доводится до такой температуры, при которой он начинает интенсивно испаряться; при этом давление в рабочем объеме быстро нарастает и ток снова выключается.

Для того чтобы пленка металла прочно держалась на поверхности стекла, последняя должна быть тщательно очищена от следов жира и различного рода загрязнений. Недопустимо также присутствие воды в рабочем объеме установки, так как в этом случае покрытие становится хрупким и цвет его изменяется вследствие образования окислов металлов. Присутствие масляных паров также ухудшает качество покрытия.

Удаление поверхностных загрязнений и поглощенного стеклом газа производится путем нагревания стекла в вакууме при температуре $400\text{--}500^\circ$ за счет помещения стеклянных деталей в нагревательный элемент в виде спирали из нихромовой проволоки. Поверхность стекла может очищаться также путем бомбардировки ионами. В этом случае стеклянные детали помещаются вблизи электродов, между которыми поддерживается электрический разряд при давлении 10^{-1} — 10^{-2} мм рт. ст.

Испаряющийся металл конденсируется не только на поверхностях обрабатываемого предмета, но и на внутренней поверхности рабочей камеры, если не принять специальные меры для предотвращения этого явления. Осаждение металла на внутренних поверхностях рабочей камеры недопустимо, так как в этом случае стенки камеры поглощают значительное количество газов, что существенно затрудняет процесс откачки и достижение требуемого рабочего разрежения при последующих циклах нанесения покрытий. Наличие в камере съемного латунного экрана предотвращает непосредственное попадание испаряющихся молекул металла на стенки камеры, а с самого экрана они могут по мере надобности удаляться химическим способом; в случае необходимости экран вообще может быть заменен.

Для испарения металла можно пропускать электрический ток непосредственно через ленту или проволоку из испаряемого металла или же использовать в качестве нагревательного элемента проволоку или спираль из тугоплавкого металла (вольфрам, молибден), на которой укрепляется кусок испаряемого металла. При нагреве металл, плавясь, превращается в каплю, которая затем постепенно испаряется.

Поскольку некоторые металлы (например хром) при расплавлении в вакууме не пристают к поверхности вольфрамовой спирали, то их предварительно расплавляют в атмосфере водорода, где они приходят в тесное соприкосновение с вольфрамовой

нити. Другие металлы (например никель, железо, алюминий, платина) способны в расплавленном состоянии разъесть вольфрам, в силу чего приходится употреблять более прочную нить, которая получается путем скручивания вместе трех или четырех вольфрамовых проволок с одной проволокой из того металла, который должен испаряться. Такая витая проволока долго не перегорает и с нее не скатываются капли расплавленного металла. Поскольку вольфрам плохо смачивается в вакууме серебром и медью, то для испарения этих металлов в качестве нагревательного элемента часто используются молибденовые нити.

Кроме того, испаряемый металл иногда помещают в корытце, чашечку или небольшой тигелек из другого тугоплавкого металла со значительно более высокой температурой плавления, который в свою очередь нагревается либо электрическим током, либо индукционными токами от генератора высокой частоты.

Тонкие металлические пленки можно наносить не только путем испарения металла и конденсации его в вакууме, но также с помощью катодного распыления.

Сущность катодного распыления состоит в том, что под действием электрического разряда в разреженном газе возникает явление переноса частиц металла с отрицательного электрода на какую-либо поверхность, помещаемую в области разряда, благодаря чему поверхность покрывается очень тонким слоем металла.

Устройство для металлизации путем катодного распыления изображено на рис. 56. Стеклообразный предмет *11*, который требуется металлизировать, устанавливается на алюминиевом анодном диске *10*. Над металлируемым предметом находится катод *12* из распыляемого металла, прикрепленный к пустотелому катодному стержню. В процессе распыления катодный стержень охлаждается проточной водой.

Давление, при котором производится катодное распыление, обычно составляет 10^{-1} мм рт. ст. и регулируется с помощью натекателя.

Форма катода чаще всего выбирается такой, чтобы она соответствовала форме покрываемой металлом поверхности. Так, например, для металлизации внутренней поверхности трубки в качестве катода употребляют проволоку, располагая ее вдоль оси трубки. Для металлизации наружной поверхности трубки применяют катоды в виде полых цилиндров.

Скорость катодного распыления пропорциональна приложенному между электродами напряжению, силе разрядного тока и наоборот пропорциональна давлению.

Наиболее легко подвергаются катодному распылению такие металлы, как золото, серебро и платина; для получения пленок меди, железа и никеля требуется вдвое больше времени, а легкие металлы, например алюминий и магний, осаждаются путем катодного распыления настолько медленно, что оно вообще редко

применяется для получения пленок этих металлов. По этой же причине анод чаще всего делается из алюминия, который очень слабо распыляется.

Для того чтобы не происходило загрязнение пленок другими находящимися внутри установки металлами, нельзя допускать, чтобы разряд достигал этих металлов.

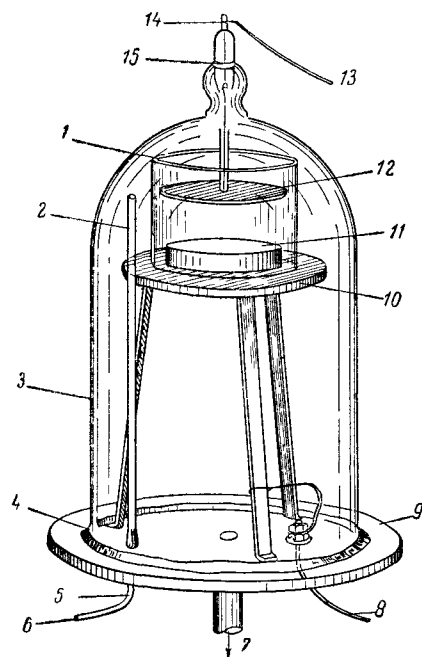


Рис. 56. Устройство для металлизации путем катодного распыления:

1 — стеклянный цилиндр, 2 — стеклянная трубка, 3 — стеклянный колок, 4 — уплотнение из воска и смолы, 5 — металлическая трубка для впуска газа, 6 — впуск газа, 7 — трубопровод для присоединения к вакуумному насосу, 8 — к положительному полюсу источника высокого напряжения, 9 — алюминиевый столик, 10 — алюминиевый анодный диск, 11 — металлируемый предмет, 12 — катод из распыляемого металла, 13 — к отрицательному полюсу источника высокого напряжения, 14 — заливка из твердого воска, 15 — заливка из воска и смолы

Плохая теплопроводность волокнистых материалов объясняется наличием в них большого количества пор и капилляров, заполненных воздухом. Удаление из этих пор и капилляров воздуха и заполнение их пропитывающим составом, теплопроводность которого больше теплопроводности воздуха, улучшают теплоотдачу изоляционных материалов, в результате чего, например, заметно снижается нагрев обмоток электродвигателей. Кроме того, при этом повышается механическая и электрическая прочность изоляции. Дело в том, что при наличии в материале

5. Сушка и пропитка под вакуумом электротехнических материалов

Широко используемые в электротехнической промышленности волокнистые электроизоляционные материалы (хлопчатобумажные и шелковые пряжи, ткани и ленты, различные сорта изоляционной бумаги, картона и др.) в натуральном виде обладают большой гигроскопичностью, малой нагревостойкостью, низкой теплопроводностью, а также относительно плохими диэлектрическими свойствами при воздействии на них влаги.

Пропитка электроизоляционных материалов различного рода составами (лаками, компаундами, битумами и др.) затрудняет проникновение влаги внутрь вещества, замедляет происходящие в нем окислительные процессы, повышая тем самым нагревостойкость материала.

Плохая теплопроводность волокнистых материалов объяс-

няется тем, что при наличии в материале пор и капилляров, заполненных воздухом, удаление из этих пор и капилляров воздуха и заполнение их пропитывающим составом, теплопроводность которого больше теплопроводности воздуха, улучшают теплоотдачу изоляционных материалов, в результате чего, например, заметно снижается нагрев обмоток электродвигателей. Кроме того, при этом повышается механическая и электрическая прочность изоляции. Дело в том, что при наличии в материале

изоляции воздушных включений могут возникнуть дополнительные потери электрической энергии в результате ионизации воздуха в этих включениях. При этом значительно ускоряются процессы старения и разрушения волокнистых материалов, а также облегчаются условия пробоя изоляции.

Заполнение воздушных включений соответствующим лаком или компаундом устраняет возможность внутренней ионизации и повышает срок службы изоляции. Однако непосредственная пропитка содержащей влагу изоляции может привести к частичному закупориванию этой влаги в порах и капиллярах, вследствие чего удаление ее в дальнейшем будет затруднено. Волокнистые изоляционные материалы обильно поглощают влагу из окружающего воздуха во время хранения на складах и в кладовых, при транспортировке, а также в цехах, где производится их обработка. Поэтому, прежде чем производить их пропитку, необходимо полностью удалить влагу путем предварительной сушки изоляционных материалов в специальных сушильных печах.

Вакуумные сушильные печи представляют собой герметически закрывающиеся металлические баки круглого или прямоугольного сечения, внутри которых расположены нагреватели (чаще всего в виде змеевика, по которому пропускается пар, нагретый до температуры 110—120°). Для уменьшения тепловых потерь наружная поверхность печи обычно покрывается толстым слоем теплоизоляции. При хорошей герметичности вакуумной печи и использовании насосов, обладающих значительной быстротой действия (в качестве которых обычно применяются золотниковые вращательные насосы, снабженные газобалластными устройствами), остаточное давление в рабочем объеме печи поддерживается около 10—20 мм рт. ст. Большим преимуществом вакуумных печей по сравнению с обычными печами, в которых сушка производится при атмосферном давлении, является возможность полного и интенсивного удаления влаги при относительно невысоких температурах.

Иногда совмещают процессы вакуумной сушки и пропитки, выполняя их на одной универсальной установке. Наиболее совершенным способом пропитки является такой, когда подлежащие пропитке детали сперва подвергают интенсивной сушке в автоклаве (специальном котле, который герметически закрывается крышкой и снабжается приспособлением для обогрева), а затем в этом же котле пропитывают лаком или компаундом под давлением.

Упрощенная схема установки, предназначенной для сушки и пропитки с применением вакуума и давления, показана на рис. 57. Предварительная сушка производится в автоклаве 1, в процессе которой в рабочем объеме поддерживается разрежение 10—20 мм рт. ст., а выделяющиеся из высушиваемых материалов пары и

газы непрерывно удаляются вращательным масляным насосом 2. После окончания сушки открывают вентиль 3 на трубопроводе, соединяющем нижнюю часть автоклава с резервуаром 4, в котором находится расплавленный компаунд. За счет атмосферного давления компаунд подается в автоклав, после чего вакуумный насос выключают, вентили 3 и 5 перекрывают, а вентиль 6 открывают и на находящийся в автоклаве пропитывающий состав дают давление в несколько атмосфер от компрессора (или просто от баллона 7 со сжатой углекислотой).

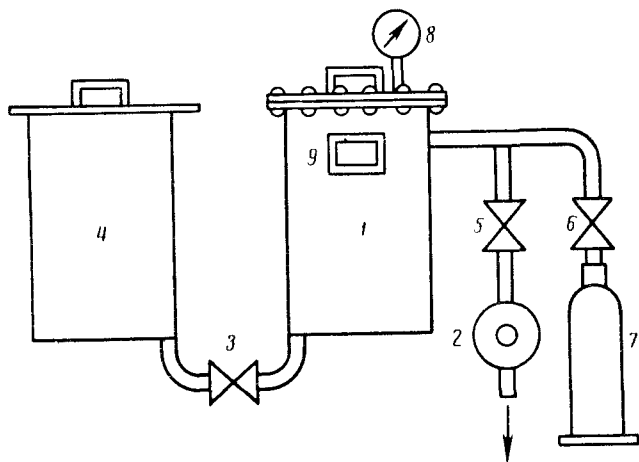


Рис. 57. Схема установки для сушки и пропитки с применением вакуума и давления.

1 — автоклав, 2 — вращательный масляный насос, 3 — вентиль, 4 — резервуар для пропитывающего состава, 5 — вентиль на трубопроводе вакуумного насоса, 6 — вентиль на трубопроводе сжатого газа, 7 — баллон со сжатой углекислотой, 8 — манометр, 9 — смотровое окно

Таким путем пропитывающий состав принудительно загоняется во все поры и капилляры пропитываемой изоляции, в результате чего удается получить более быструю и глубокую пропитку. Для того чтобы сохранить малую вязкость пропитывающего состава, обогрев автоклава не прекращают до конца процесса пропитки.

Наиболее совершенная пропитка с применением вакуума и давления получается при использовании тренировочного режима, в процессе которого на компаунд, которым залиты пропитываемые объекты, дается давление, после чего оно сбрасывается и вновь производится откачка автоклава вакуумным насосом, потом снова на несколько минут дается давление и т. д. (до 3—5 циклов). При этом получается наиболее глубокая и высококачественная пропитка

6. Сушка пищевых продуктов методом сублимации в вакууме

Сублимация — это возгонка, т. е. переход твердого тела в парообразное, минуя жидкую фазу. В промышленности широко распространена сушка методом сублимации в вакууме.

Если при тепловой сушке из материала испаряется вода, то при сушке сублимацией влажный материал замораживается и лед затем сублимируется, т. е. испаряется непосредственно из твердого состояния под вакуумом.

При сублимации испарение начинается с поверхности материала, а дальше зона испарения постепенно перемещается внутрь материала. По мере сушки образуется сухой, губчатый высокопористый слой продукта, представляющий собой каркас с ячейками, равными кристаллам испаряющегося льда или несколько большими. Пары льда по мере его испарения попадают в разреженное пространство сублиматора, из которого удаляются откачкой в конденсатор, где конденсируются и замораживаются.

Сушка пищевых продуктов методом сублимации в вакууме имеет ряд важных преимуществ по сравнению с тепловой сушкой:

1. Из-за низкой температуры пищевые продукты в процессе сублимации предохраняются от химических и бактериологических изменений, сохраняя присущие им вкус и запах.

2. Применение низкой температуры и вакуума предохраняет находящиеся в продукте витамины от окисления.

3. Продукты, высушенные сублимацией, имеют минимальную усадку, хорошо сохраняют форму и размеры в процессе сушки.

4. Биологическая активность материала не затрагивается сублимацией, так что питательная ценность продукта не снижается.

5. Высушенные продукты, представляющие собой высокопористую массу, в дальнейшем легко набухают и растворяются в воде. Вместе с тем они допускают длительное хранение, не требуя при этом низких температур.

В настоящее время метод сублимации применяется для сушки:

а) медицинских препаратов: кровяной плазмы и сыворотки, вакцин, гормонов, антибиотиков (пенициллина и стрептомицина), витаминных препаратов; б) бактерий и вирусов (хорошие результаты получены, например, при сушке молочнокислых заквасок для молочной и маргариновой промышленности, а также микроорганизмов для винодельческой промышленности; в) пищевых продуктов: сырого мяса, рыбы, макарон, сухарей, различных фруктовых соков, свежих ягод и овощей, яиц, молока и т. д.

Схема установки для сушки пищевых продуктов методом сублимации изображена на рис. 58. Подготовленный для сушки продукт в противнях устанавливается на пустотелые полки сублиматора 1. При помощи вращательного вакуумного насоса 7 по всей системе (сублиматоре 1, конденсаторе 4, трубопроводах) создается разрежение 1—2 мм рт. ст

С созданием вакуума в системе начинается сушка, в процессе сушки за счет работы аммиачной холодильной установки трубчатая поверхность 5 конденсатора охлаждается до температуры $-25-30^{\circ}$. Поскольку температура поверхности конденсатора ниже, чем температура замороженного продукта, то и давление паров воды в конденсаторе ниже, чем у поверхности замороженного продукта.

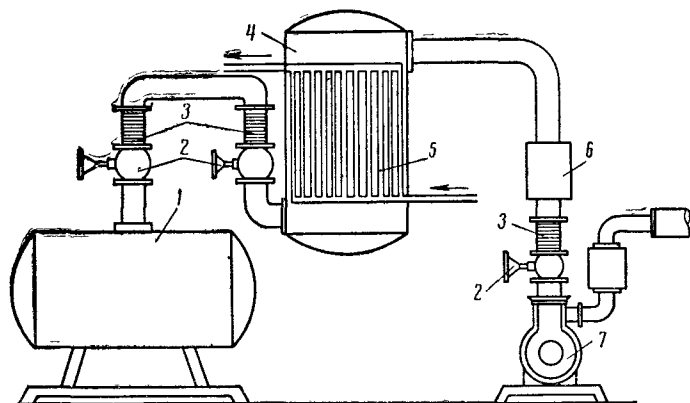


Рис. 58. Схема установки для сушки пищевых продуктов методом сублимации:

1 — сублиматор, 2 — вентиль, 3 — сиффон, 4 — конденсатор-вымораживатель, 5 — трубчатая поверхность с хладагентом, 6 — фильтр, 7 — вращательный вакуумный насос

Разница между упругостями паров в сублиматоре и конденсаторе создает тягу паров в конденсатор с определенной скоростью, в основном зависящей от поверхности конденсатора и перепада давлений, чем и обеспечивается удаление влаги из сублиматора. При температуре продукта -10° и температуре поверхности конденсатора -30° разность давления составляет около 2 мм рт. ст., что обеспечивает необходимую скорость откачки.

Процесс сушки сублимацией имеет три периода: самозамораживание продукта, сушка сублимацией при температуре ниже 0° и тепловая вакуумная сушка при положительных температурах $+40^{\circ}$, что достигается подачей горячей воды в пустотелые полки сублиматора.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3

I. Понятие о вакууме и важнейшие свойства разреженного газа

II. Техника получения и измерения вакуума

1. Современные способы получения вакуума	11
2. Вакуумные насосы	12
3. Физико-химические способы получения вакуума	23
4. Новые методы откачки	26
5. Устройство вакуумных систем	30
6. Техника измерения вакуума	42
7. Получение и измерение сверхвысокого вакуума	50
8. Испытание вакуумной аппаратуры на герметичность	51

III. Примененне вакуума

1. Производство электровакуумных приборов	60
2. Электронный микроскоп	73
3. Плавка и спекание металлов в вакууме	76
4. Металлизация в вакууме	81
5. Сушка и пропитка под вакуумом электротехнических материалов	84
6. Сушка пищевых продуктов методом сублимации в вакууме	87

Данилин Борис Степанович

Вакуум и его применение

Научный редактор А. Б. Цейтлин

Редактор М. В. Кобринская

Технический редактор Ю. Н. Горохов

Корректор З. Г. Юрьевская

А 09734 Сдано в набор 9/X 1958 г. Подп. к печ. 10/XII 1958 г.
 Формат бум. 60×92/16—5,75 п. л. В 1 п. л. 38 600 зн. Уч.-изд. л. 5,3
 Уч. № 172/3702. Тираж 5 000 экз. Цена 1 руб. 90 коп.

Тип. Трудрезервиздата, Москва, Хохловский пер., 7. Зак. 1364