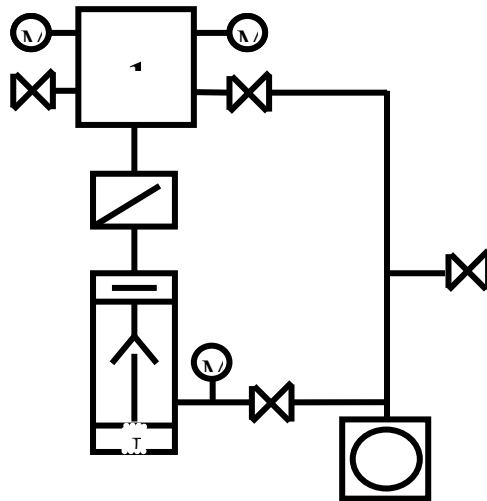


А.В. Ситников К.Г.Королев А.В.Калгин

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОСНОВАМ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

учебное пособие



Воронеж 2016

ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический  
университет

А.В. Ситников К.Г.Королев А.В.Калгин

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОСНОВАМ  
ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебно-методического пособия

Воронеж 2016

Ситников А.В. Лабораторный практикум по основам вакуумной техники: учеб.-метод. Пособие/ А.В. Ситников, К.Г.Королев, А.В.Калгин. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический университет, 2016. -79 с.

В пособие приводятся теоретические сведения , схемы, рисунки, лабораторные задания, порядок выполнения и контрольные вопросы.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлениям 16.03.01 «Техническая физика» (направленность «Физическая электроника»), 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» (направленность «Компоненты микро- и наносистемная техника»), 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» (направленность «Компоненты микро- и наносистемная техника»), 14.03.01 Техника и физика низких температур (направленность «Ядерная энергетика и теплофизика») по дисциплинам «Физические основы вакуумной техники», «Вакуумная техника», «Криовакуумная техника».

Табл. 2. Ил. 27. Библиогр.: 5 назв.

Рецензенты: кафедра физики и химии Военного учебного центра «Военно-воздушных сил им. Фрофессора Н.Е.Жуковского и Ю.Е.Гагарина» (канд. физ.-мат. Наук А.А.Гребенников);  
канд. физ.-мат. наук, доц. В.В.Ожерельев

© Ситников А.В., Королев К.Г., Калгин А.В., 2016

## **Механические методы получения вакуума**

**Цель работы:** Ознакомиться с устройством и работой вакуумных механических насосов.

**Приборы и оборудование:** насос механический вакуумный НВР-2М.

### **1. Общие сведения**

#### **1.1 Общая характеристика вакуумных насосов**

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

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

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

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

Объем газа, поступающий в единицу времени из откачиваемого объекта в трубопровод через сечение II ( $V_2$ ) при

давлении  $p_2$  называется быстротой откачки объекта или эффективной быстротой откачки насоса:

$$S_{\text{эф}} = dV_2/dt . \quad (1)$$

Объем газа, удаляемый насосом в единицу времени через входной патрубок (сечение I) ( $V_1$ ) при давлении  $p_1$ — это быстрота действия насоса:

$$S_{\text{н}} = dV_1/dt . \quad (2)$$

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

$$K_{\text{н}} = S_{\text{эф}}/S_{\text{н}} . \quad (3)$$

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

$$Q = p_1 S_{\text{н}} = p_2 S_{\text{эф}} = p_i S_i . \quad (4)$$

Установим связь между тремя основными характеристиками вакуумной системы: быстротой действия насоса  $S_{\text{н}}$ , эффективной быстротой откачки объекта  $S_{\text{эф}}$  и проводимостью вакуумной системы между насосом и откачиваемым объектом  $U$ . Согласно (4) и если выразить газовый поток не в кг/с, а в условных единицах потока газа, то

$$Q = \frac{P_k T_0}{m} = \frac{D_{\text{э}} A T_0}{l T} (p_1 - p_2) = U (p_1 - p_2) , \quad (5)$$

где  $Q$  - газовый поток, Па м<sup>3</sup>/с;  $U$  — проводимость элемента вакуумной системы, м<sup>3</sup>/с. Тогда из (4) можно записать:

$$\begin{aligned} S_{\text{н}} &= Q/p_1 = U(p_2 - p_1)/p_1, \\ S_{\text{эф}} &= Q/p_2 = U(p_2 - p_1)/p_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Если переписать (6) в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{S_{\text{н}}} &= \frac{p_1}{(p_2 - p_1)U} , \\ \frac{1}{S_{\text{эф}}} &= \frac{p_2}{(p_2 - p_1)U} , \end{aligned}$$

то после вычитания первого выражения из второго получим

$$\frac{1}{S_{эф}} - \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U}. \quad (7)$$

Уравнение (7) называют основным уравнением вакуумной техники. Его можно также переписать в виде

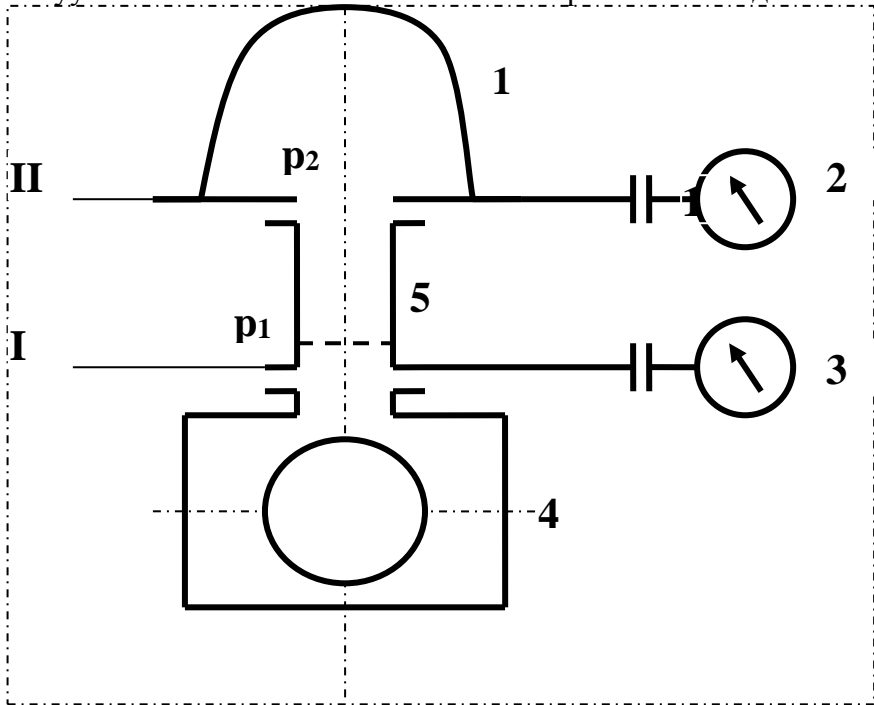


Рис.1. Схема вакуумной системы: 1 - откачиваемый объем, 2 - манометр в камере, 3 - манометр на входе механического насоса, 4 - механический насос, 5 - вакуумная магистраль

$$S_{эф} = S_n U / (S_n + U). \quad (8)$$

При условии  $S_n = U$  из (8) получим, что  $S_{эф} = 0,5 S_n$ . Если  $U \rightarrow \infty$ , то  $S_{эф} \rightarrow S_n$ , а при  $U \rightarrow 0$  следует, что  $S_{эф} \rightarrow 0$ .

Вводя в основное уравнение коэффициент использования насоса  $K_n$ , согласно (3), получим два полезных соотношения:

$$K_n = U / (S_n + U); \quad (9)$$

$$U = S_n K_n / (1 - K_n). \quad (10)$$

Графическая интерпретация уравнения (9) приведена на рис. 2. Максимальное значение коэффициента использования насоса равно единице.

Предельное давление насоса  $p_{пр}$  — это минимальное давление, которое может обеспечить насос, работая без откачиваемого объекта. Быстрота действия насоса при приближении к предельному давлению стремится к нулю. Предельное давление большинства вакуумных насосов определяется газовыделением материалов, из которых изготовлен насос, перетеканием газов через зазоры и другими явлениями, возникающими в процессе откачки.

Наименьшее рабочее давление вакуумного насоса  $p_m$  — это минимальное давление, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия. Наименьшее рабочее давление примерно на порядок выше предельного. Использование насоса для работы при давлениях между предельным и наименьшим рабочим экономически неоправданно из-за ухудшения его удельных характеристик.

Наибольшее рабочее давление вакуумного насоса  $p_b$  — это максимальное давление, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия. В рабочем диапазоне от наименьшего до наибольшего рабочего давления обеспечивается эффективное использование насоса. Рабочие диапазоны давлений вакуумных насосов в основном определяются их принципом действия, что показано на рис.3.

Давление запуска вакуумного насоса  $p_z$  — это максимальное давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу. Давление запуска обычно заметно превышает наибольшее рабочее давление. Для

некоторых типов насосов, например магниторазрядных, это различие может достигать 2...3 порядков.

Параметры вакуумных насосов показаны на основной характеристике вакуумного насоса — зависимости быстроты действия от его входного давления (рис.4).

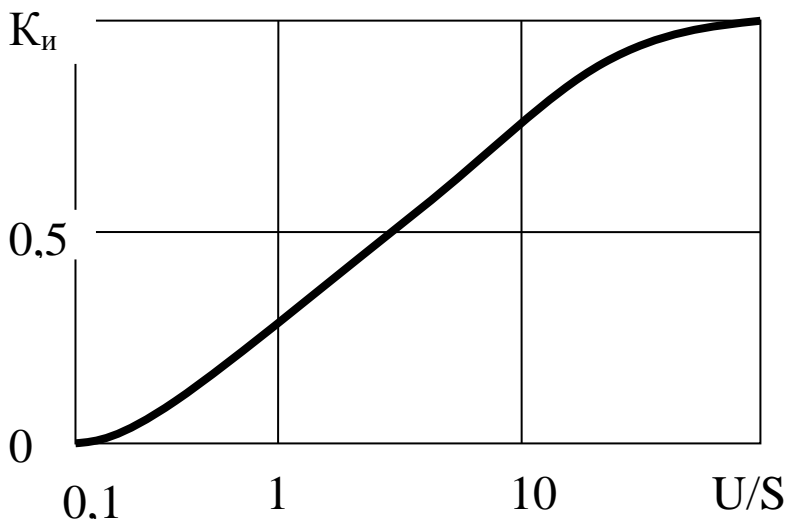


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования насоса от отношения проводимости к быстроте действия



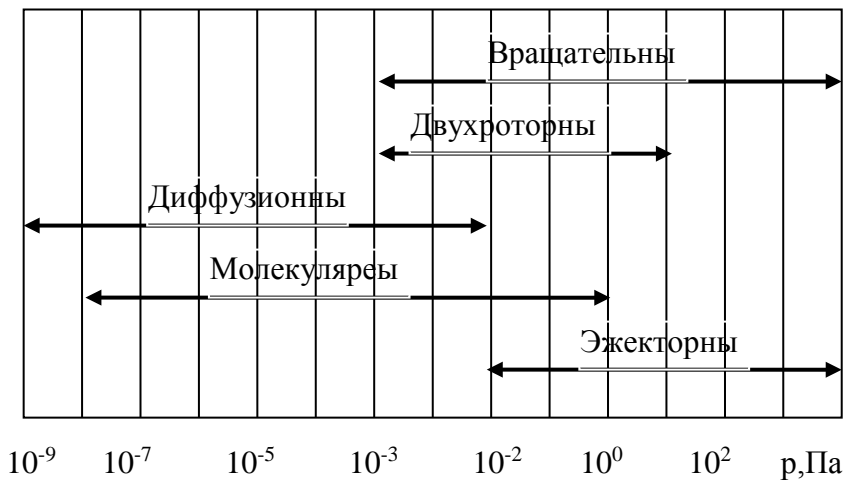


Рис. 3. Диапазон рабочих давлений вакуумных насосов

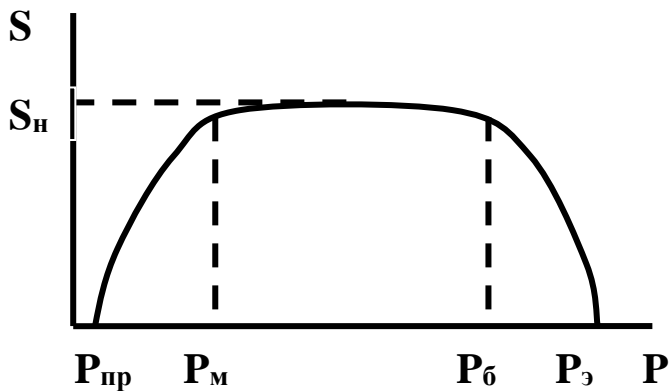


Рис. 4. Основные характеристики вакуумного насоса. Зависимость быстроты действия от давления на входе насоса

## **1.2 Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением**

### **1.2.1 Принцип действия**

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

На рис. 5 приведена схема пластинчато-роторного насоса. В цилиндрической расточке камеры насоса 1 вращается в направлении, указанном стрелкой, эксцентрично расположенный ротор 2, в прорези которого свободно вставлены пластины 3 с пружиной 4. При вращении ротора пластины скользят по внутренней поверхности цилиндра, и в камере насоса образуются две полости переменного объема: I (полость всасывания) и II (полость сжатия). Полость всасывания I при вращении ротора увеличивает свой объем, и в нее поступает газ из впускного патрубка 5, связанного с откачиваемым сосудом. Объем полости сжатия II, расположенный на выпускной стороне, уменьшается при вращении ротора, и в ней происходит сжатие газа. Эта полость соединена с клапаном 6. Когда давление газа в полости II станет достаточным для открытия клапана, произойдет выхлоп. В процессе работы зазоры в роторном механизме уплотняются рабочей жидкостью насоса — маслом, благодаря чему обратное перетекание газа с выхода на вход становится ничтожно малым. Масло заполняет и так называемые вредные пространства, из которых газ вытесняется при работе роторного механизма (например, объем под клапаном), и исключает их влияние, ведущее к повышению предельного остаточного давления. Одновременно масло обеспечивает смазку и частичное охлаждение механизма насоса. Масло поступает в камеру насоса через зазоры и сверления в корпусе из маслорезервуара, где оно находится под атмосферным

давлением, а через выхлопной клапан вновь возвращается в маслорезервуар.

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

На рис. 6 показана схема пластинчато-статорного насоса, в котором пластина 3, разделяющая полости всасывания I и сжатия II, свободно скользит в прорези статора 1, прижимаясь к ротору 2 под действием пружины 4 (через рычаг 5). Путь газа через насос показан стрелками.

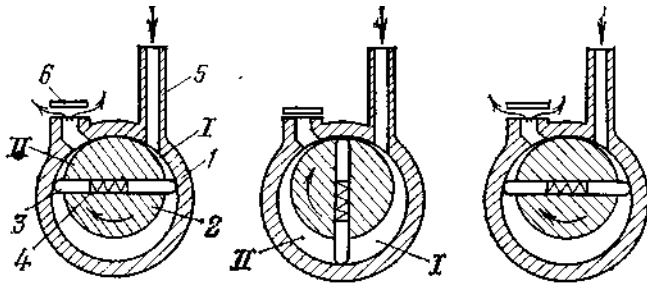


Рис. 5. Схема пластинчато-роторного насоса

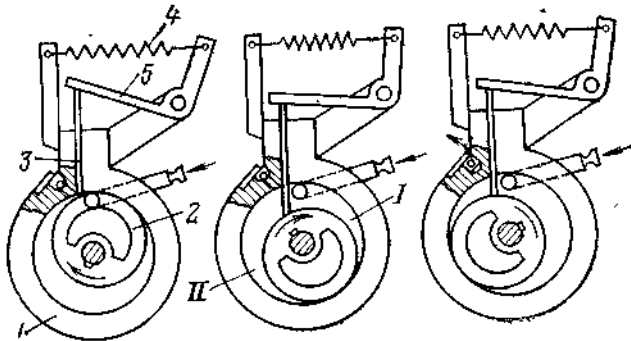


Рис. 6. Схема пластинчато-статорного насоса

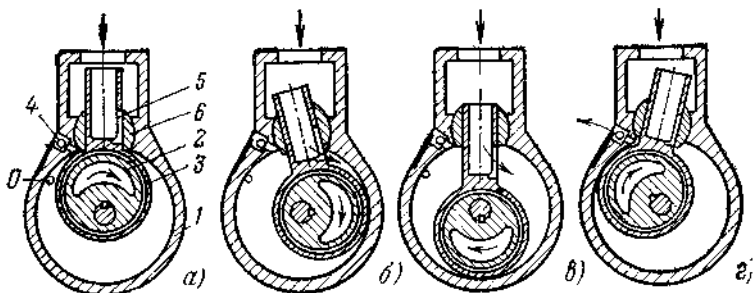


Рис. 7. Схема плунжерного (золотникового) насоса

Схема плунжерного (золотникового) насоса показана на рис. 7. В цилиндрической камере корпуса 1 насоса вращается эксцентрик 2 с надетым на него плунжером 3. Газ из откачиваемого сосуда поступает в полость всасывания через окно 5 в прямоугольной части плунжера, который скользит в направляющей 6, свободно поворачивающейся в гнезде корпуса 1. При повороте эксцентрика 2 на некоторый угол от верхнего положения (рис. 7.а) окно 5 в прямоугольной части плунжера выходит из направляющей 6 вниз (рис. 7.б), полость всасывания соединяется с впускным патрубком насоса и газ поступает в полость всасывания (рис. 7.в), непрерывно увеличивающую свой объем, пока окно 5 не будет снова перекрыто (рис. 7.г). Одновременно в полости сжатия происходят сжатие и выталкивание газа через выхлопной клапан 4. Процесс напуска газа через окно напоминает работу золотникового распределительного устройства, поэтому насосы такого типа получили название золотниковых.

### 1.2.2. Параметры и характеристики

Предельное остаточное давление и некоторые другие параметры механических насосов с масляным уплотнением в значительной степени зависят от свойств рабочей жидкости (масла), залитой в насос. Как газы, так и конденсирующиеся пары, создающие обратный поток, попадают на вход насоса из циркулирующего в нем масла. Перед поступлением в камеру

насоса масло некоторое время находится в маслорезервуаре, где подвергается воздействию атмосферного воздуха и поглощает газы. При поступлении масла в рабочую камеру поглощенные ранее газы выделяются из пленки масла и поступают на вход насоса.

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

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

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

Кроме продуктов крекинга, на входе насоса обычно имеются пары загрязняющих масло легколетучих веществ (воды, растворителей).

Для получения давлений остаточных газов ниже  $10^{-1}$  Па используют двухступенчатые насосы с масляным уплотнением. Схема такого насоса показана на рис. 8. Ближайшая к откачиваемому сосуду высоковакуумная ступень I должна создавать небольшой перепад давлений (не более  $0,1$  Па) и поэтому не нуждается в масляном уплотнении, так как при низком давлении узкие зазоры обладают большим сопротивлением потоку газа. Ступень II в процессе работы обычно не сообщается с масляным резервуаром ступени II, и в

нее не заносится воздух, растворенный в масле, благодаря чему и возможно достижение низких давлений. Небольшое количество масла, имеющееся в некоторых конструкциях насосов в отдельном маслорезервуаре ступени I для смазки механизма, находится под непрерывной откачкой ступеню II, так что легкие фракции масла, имеющиеся в ступени I, непрерывно откачиваются. Поэтому на входе двухступенчатого насоса.

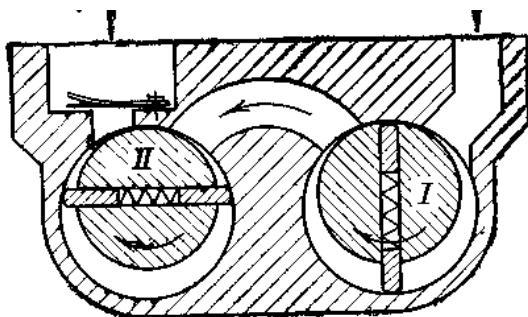


Рис. 8. Схема двухступенчатого насоса с масляным уплотнением. *I* и *II* — ступени насоса

количество паров легких фракций масла, определяющих полное остаточное давление, значительно меньше, чем у одноступенчатого.

Давление остаточных газов у лучших образцов двухступенчатых насосов составляет  $10^{-3}$  Па, полное остаточное давление  $6,5 \cdot 10^{-1}$  Па. У насосов с масляным уплотнением давление остаточных газов в основном определяется качеством изготовления.

Как уже отмечалось, полное остаточное давление насоса зависит от состава (наличия летучих фракций) и состояния (в первую очередь — от температуры) рабочей жидкости. При повышении температуры масла наблюдается повышение, как полного остаточного давления насоса, так и давления остаточных газов.

После запуска холодного насоса установившаяся температура масла (50—70°C) достигается через 2—3 ч в зависимости от размеров насоса.

Быстрота действия  $S_H$  насосов с масляным уплотнением определяется их конструкцией.

Быстрота действия насосов объемного действия практически не зависит от рода откачиваемого газа, так как разница в проводимости входных коммуникаций по разным газам очень мало сказывается на быстроте действия насоса.

### **1.2.3. Рабочие жидкости для насосов**

В качестве рабочей жидкости насосов с масляным уплотнением, как правило, используются продукты, получаемые из промышленных минеральных масел. Кроме обычных требований (низкая кислотность, необходимая вязкость, хорошие смазывающие свойства и т. п.), к маслам для вакуумных насосов предъявляются дополнительные: высокая термическая стойкость и низкое давление паров в интервале рабочих температур насоса, так как в противном случае невозможно получение низких предельных остаточных давлений.

### **1.2.4. Конструкции**

Пластинчато-роторные насосы выполняются обычно с быстротой действия до 6 л/с. Это объясняется тем, что в местах контакта пластин с камерой насоса достигаются достаточно высокие относительные скорости, что и ограничивает, главным образом, создание крупных пластинчато-роторных насосов.

В плунжерных (золотниковых) насосах трение происходит лишь в направляющей, где относительная скорость сравнительно невелика. Поэтому средние (от 6 до 100 л/с) и крупные (свыше 100 л/с) насосы выполняются плунжерными (золотниковыми).

Недостатком плунжерных (золотниковых) насосов является неуравновешенность движущихся масс.

Пластинчато-статорные насосы просты по конструкции, так как имеют минимальное количество трущихся пар, но из-за больших относительных скоростей пластины и ротора и значительной неуравновешенной массы эксцентричного ротора в настоящее время практически не изготавливаются.

В малых насосах рабочие камеры герметизированы от попадания атмосферного воздуха путем погружения их в коробку с маслом, при этом обычно не требуется дополнительных уплотнений между цилиндрами и торцами рабочих камер. Вал насоса выводится из масляной ванны через самоподтягивающуюся резиновую манжету, предотвращающую течь масла.

Камеры средних и крупных насосов выполняются из вакуум-плотных отливок и не требуют погружения в масляную ванну. Места соединения торцевых крышек с цилиндрами герметизируются в этом случае шеллаком или глифталевым лаком или же резиновыми прокладками. Вал выводится в атмосферу через заполненный маслом сальник с самоподтягивающейся резиновой манжетой.

Входные патрубки малых насосов часто выполняются в виде штуцеров под резиновый шланг, однако длинные участки резиновых шлангов во входных коммуникациях насосов делают невозможным получение низких предельных остаточных давлений из-за большого газовыделения резины, поэтому в последних моделях малых насосов входные патрубки делаются, как и у крупных, фланцевыми.

Во входных патрубках насосов иногда устанавливают металлические сетки, защищающие механизм насоса от попадания мелких твердых предметов, выводящих насос из строя.

В средних и крупных насосах масляный резервуар выполняется либо заодно с корпусом насоса, либо в виде отдельного бака, соединенного трубками для подачи масла к соответствующим местам насоса. Приемное отверстие трубки или канала для подачи масла в рабочую камеру насоса всегда



располагается выше дна масляного резервуара, что предотвращает попадание грязи и воды в насос.

Если на вход остановленного насоса не напустить атмосферный воздух, то масло в резервуаре, находящееся под атмосферным давлением, заполнит камеру насоса, в которой сохраняется разрежение, и поднимется во впускной патрубок и даже в откачиваемый сосуд (если во впускной коммуникации не установлен клапан). Последующий запуск насоса сильно затрудняется необходимостью вытеснить из камеры вязкое масло через выхлопной клапан и вызывает большие нагрузки на механизм насоса при резком пуске двигателя.

Для предотвращения всасывания масла в маслопроводе некоторых средних и крупных насосов устанавливают клапан, который надо открывать непосредственно после запуска и закрывать перед выключением насоса. У дистанционно управляемых насосов в маслопроводах устанавливают электромагнитный клапан, срабатывающий при включении и выключении электродвигателя или приводящийся в действие от центробежного механизма, связанного со шкивом насоса.

Малые насосы, как правило, не имеют запирающих устройств в маслопроводе, поэтому для предотвращения всасывания масла во впускную коммуникацию необходимо напустить воздух на вход остановленного насоса. Масло может проникать в остановленный насос и через выхлопной клапан; чтобы этого не происходило, объем масла, находящийся над выхлопным клапаном, ограничивают, окружая клапаны щитками или кожухами.

Работа насоса при высоких впускных давлениях  $10^4$  Па сопровождается выбросами брызг и капель масла в выхлопной патрубок вместе с потоком откачиваемого газа. Для устранения этого явления у выхлопного отверстия насоса устанавливают маслоотделители (маслоотбойники), например, в виде щитков. В насосах средних размеров иногда используют отдельные маслоотбойники, прикрепленные к выхлопному отверстию в корпусе, насоса.

При впускных давлениях  $10^4$ — $10^2$  Па работа насосов сопровождается образованием заметных количеств так называемого масляного тумана, который выходит из насоса в виде сизо-белого дыма. В насосах с быстротой действия до 5 л/с для задержания масляного тумана могут быть использованы простые фильтры, например бумажные, из стекловаты или керамические. Однако эти фильтры нуждаются в периодической замене (бумажные) или промывке (керамические), а также затрудняют эксплуатацию насосов, откачивающих пары воды. Поэтому лучшим способом защитить производственное помещение от поступления масляного тумана является подключение выхлопа насоса к выхлопной коммуникации с помощью дюритового шланга или металлической трубы.

#### **1.2.5. Газобалластное устройство и откачка конденсирующихся паров**

Проведение многих вакуумных технологических процессов (сушка, пропитка, дистилляция) сопровождается выделением значительных количеств конденсирующихся паров, откачка которых обычным насосом с масляным уплотнением еще 40—50 лет тому назад была очень трудной, задачей. Рассмотрим рис. 9, на котором в логарифмическом масштабе показано изменение давления газа и паров в камере насоса по мере увеличения степени сжатия

$$\epsilon = V_{BC} / V_{CЖ},$$

где  $V_{BC}$  — объем рабочей камеры насоса в момент конец всасывания;  $V_{CЖ}$  - объем рабочей камеры в момент на конец сжатия при давлении  $p_{вып} = 1,2 \cdot 10^5$  Па, когда открывается выхлопной клапан.

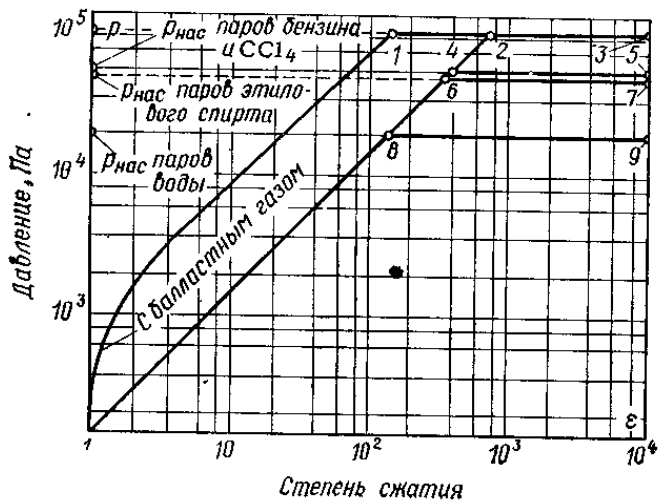


Рис. 9. Возрастание давления в камере насоса в зависимости от рода откачиваемого газообразного вещества.

Пусть давление во впускном сечении насоса составляет  $1.33 \cdot 10^2$  Па. При сжатии газа давление возрастает до  $p_{\text{вып}}$  клапан открывается и газ выталкивается из насоса (линия 1-2-3).

Иначе обстоит дело при откачке конденсирующихся паров, которые не могут быть сжаты до давления, превышающего давление насыщения  $p_{\text{нас}}$  (рис. 9), при данной температуре, так как дальнейшее сжатие приводит не к росту давления, а к конденсации некоторого количества паров, и давление в камере насоса остается постоянным, не достигая значения  $p_{\text{вып}}$ . Этот процесс показан линиями 1-6-7, 1-4-5 и 1-8-9 на рис.9 (рабочая температура в камере принята 333 К).

При конденсации в камере насоса выхлопной клапан открывается вследствие резкого гидравлического удара конденсата и масла о пластину клапана. Конденсат смешивается с маслом и ухудшает его свойства. Попавший в масло конденсат вновь испаряется в камере насоса и увеличивает полное остаточное давление.

Давление насыщения большинства встречаемых в практике паров при комнатной температуре лежит выше  $1,33 \cdot 10^3$  Па, т. е., практически может быть достигнуто только в насосах с масляным уплотнением, имеющих выпускное давление, равное атмосферному; в других насосах (двухроторных, турбомолекулярных, струйных), не работающих против атмосферного давления, эти пары не конденсируются.

Наиболее часто встречается необходимость в откачке паров воды. Вода, попавшая в масло, помимо образования трудноразделимой эмульсии масло — вода, вызывает целый ряд химических взаимодействий, ведущих к ухудшению смазывания, перегреву и осмолению насоса, не говоря уже о повышении предельного остаточного давления и коррозии отдельных деталей насоса.

Эффективным способом предотвращения конденсации паров в насосе является напуск так называемого балластного газа в камеру насоса в добавление к поступившему в нее пару после отделения камеры от впускного патрубка насоса. В качестве балластного газа обычно используется атмосферный воздух, поступающий в камеру через отдельное отверстие с обратным клапаном и связанное с краном-дозатором трубкой или отверстием в корпусе. Устройство для напуска балластного газа называют газобалластным, насос с таким устройством — газобалластным насосом. Практически все насосы выпускаются сейчас с газобалластным устройством.

В камере газобалластного насоса сжимается смесь паров с балластным газом, причем количество балластного газа определяется из условия, чтобы к моменту достижения смесью давления выхлопа парциальное давление паров не достигало давления насыщения.

Если давление насыщенных паров  $p_{\text{нас}}$  численно равно выпускному давлению  $p_{\text{вып}}$ , насос не требует балластного газа для предотвращения конденсации. Например, насос со специальным маслом, работающий при температуре примерно

380 К, способен откачивать пары воды без напуска балластного газа.

Допустимое давление паров воды на входе является паспортной характеристикой газобалластного насоса.

Следует иметь в виду, что газобалластные насосы весьма эффективны при откачке паров воды, но при откачке паров, растворяющихся в масле из паровой фазы (например, пары бензина, бензола), их эффективность снижается, о чем можно судить по снижению массовой производительности в сравнении с расчетным значением.

Поток балластного газа может регулироваться с помощью крана-дозатора. В двухступенчатых насосах напуск балластного газа, как правило, производится только в выхлопную ступень, так как в первой высоковакуумной ступени сжатия или не происходит, или оно недостаточно для конденсации паров.

Ввиду того, что балластный газ все же перетекает через механизм насоса на сторону всасывания, предельное остаточное давление одноступенчатых насосов увеличивается примерно до  $10^2$  Па. Предельное остаточное давление двухступенчатых насосов при работе с балластным газом увеличивается до 1—10 Па в зависимости от конструкции и степени износа механизма.

При работе газобалластного насоса из выпускного патрубка выходит парогазовая смесь, содержащая насыщенные пары при температуре насоса 333 К и выше. По мере движения по выпускному трубопроводу, стенки которого имеют комнатную температуру, пар конденсируется на них и конденсат может стекать обратно в насос, особенно если выпускной трубопровод имеет длинные вертикальные участки. В таких случаях в трубопроводе около насоса размещают отделитель конденсата.

Во избежание конденсации паров в камере самого насоса корпус должен быть прогрет до рабочей температуры масла перед началом откачки паров. Для этого насос включают

примерно за час до начала откачки и при закрытом впускном патрубке дают работать с полным напуском балластного газа.

### **1.2.6. Практические указания по эксплуатации**

К каждому насосу прилагается достаточно подробная инструкция по эксплуатации, однако ввиду широкого применения насосов с масляным уплотнением полезно запомнить несколько общих правил их эксплуатации.

Небольшие насосы с быстротой действия до 3—5л/с часто не закрепляются на фундаменте, а устанавливаются прямо на полу. При этом рекомендуется ставить насос в неглубокий металлический противень (на случай течи масла) и подложить под него резиновый лист для уменьшения шума. Металлическая цельнотянутая труба в качестве вакуумной коммуникации всегда предпочтительней резинового шланга, так как вследствие газовыделения резины может быть затруднено получение низких давлений. Между насосом и откачиваемым сосудом должен быть предусмотрен компенсатор вибрации, в качестве которого может быть использован кусок вакуумного резинового шланга. При использовании коротких кусков резинового шланга для соединения металлических труб следует насколько возможно сближать торцы труб.

Средние и крупные насосы обычно устанавливаются на фундаменте, впускной патрубков соединяется с магистралью откачки с помощью сиффона или другого гибкого элемента для компенсации вибраций. Перед присоединением к вакуумной системе полезно проверить создаваемое насосом полное остаточное давление при работе «на себя», т. е. с заглушкой на впускном патрубке, к которой присоединен манометрический преобразователь.

Попадание твердых предметов в рабочую камеру приводит к поломке насоса, поэтому входной патрубков насоса, отсоединенного от вакуумной системы, должен быть тщательно закрыт.

Особое внимание при эксплуатации должно быть обращено на сохранение качества и количества залитого в насос масла. Не следует без особой необходимости допускать работу насоса при высоких впускных давлениях во время откачки сосуда от атмосферного давления, так как это может привести к уносу капель масла с выхлопными газами; поэтому желательно дросселировать поток газа, не полностью открывая кран на входе насоса.

Если насос не обеспечивает необходимого предельного остаточного давления, причины этого должны отыскиваться и устраняться в следующей порядке:

- 1) недостаток масла в насосе — следует долить масло;
- 2) плохое качество масла или его загрязнение конденсатом — можно попытаться очистить масло, включив подачу балластного газа при работе насоса с закрытым впускным патрубком. Если в течение 15—20 мин предельное остаточное давление не уменьшается, следует сменить масло;
- 3) загрязнение, коррозия или поломка клапанов — необходимо вскрыть клапанную коробку и устранить неисправности;
- 4) загрязнение каналов для подвода масла в камеру насоса — устранение этого дефекта связано обычно с переборкой насоса;
- 5) износ, нарушение нормальной работы или поломка деталей — устранение таких неисправностей также связано с полной или частичной переборкой насоса.

## **2. Порядок выполнения работы**

1. Слить масло из корпуса механического насоса. Для этого поместить насос на возвышенность, подставить емкость для отработанного масла под отверстие слива (торцевая сторона корпуса), отвернуть винт слива масла, дожидаться прекращения поступления масла из отверстия слива

(наклонить насос для окончательного удаления рабочей жидкости из корпуса насоса).

2. Снять двигатель механического насоса. Для этого отвернуть 4 крепежных винта соединяющих двигатель и станину механического насоса. Обратить внимание на конструкцию узла передающего вращательное движения от вала двигателя к валу насоса.

3. Снять входной патрубок механического насоса. Для этого отвернуть 4 винта соединяющих прижимное кольцо входного патрубка к корпусу, снять входной патрубок путем выдергивания его из корпуса насоса. Обратить внимание на способ уплотнения входного патрубка с насосом.

4. Снять входной клапан газобалластного устройства. Для этого открутить два крепежных винта и вытащить узел. Обратить внимание на способ уплотнения входного клапана газобалластного устройства с насосом и конструкцию напускного клапана.

5. Снять крышку корпуса. Для этого отвернуть 6 винтов соединяющих крышку корпуса с станиной насоса, аккуратно во избежания прорыва бумажного масляного уплотнения между крышкой и станиной снять ее.

6. Отделить корпус механического насоса от станины. Для этого отвернуть 4 гайки со стороны станины и вынуть корпус.

7. Снять выпускные клапана первой и второй ступеней откачки механического насоса. Обратить внимание на конструкцию выпускных клапанов.

8. Разобрать вторую камеру двухкамерного механического насоса. Для этого отвернуть крепежные винты стягивающие корпус второй ступени, выбить штифты, аккуратно во избежание нанесения рисок и задиров на шлифованные части корпуса отделить заднюю крышку от корпуса, за тем снять ротор второй ступени насоса, снять корпус. Обратить внимание на узел подпружиненных лопаток, отверстия, соединяющие первую и вторую камеры откачки, поверхность трущихся частей эбонитовых лопаток и цилиндра камеры.



9. Разобрать первую камеру двухкамерного механического насоса. Для этого отвернуть крепежные винты шпилек стягивающие корпус первой ступени, выбить штифты, аккуратно во избежание нанесения рисок и задиров на шлифованные части корпуса отделить заднюю крышку от корпуса, корпус первой камеры. Обратить внимание на узел подпружиненных лопаток, отверстия, соединяющие первую и вторую камеры откачки, поверхность трущихся частей эбонитовых лопаток и цилиндра камеры, систему эксцентричного клапана подачи воздуха в насос при остановки вращения двигателя.
10. Собрать первую камеру двухкамерного механического насоса. Последовательность операций обратная п.9.
11. Собрать вторую камеру двухкамерного механического насоса. Последовательность операций обратная п.8.
12. Смонтировать выпускные клапана первой и второй ступеней откачки механического насоса.
13. Привернуть корпус механического насоса к станине.
14. Поставить крышку корпуса насоса. Последовательность операций обратная п.5.
15. Смонтировать входной клапан газобалластного устройства. Последовательность операций обратная п.4.
16. Смонтировать входной патрубок механического насоса. Последовательность операций обратная п.3.
17. Поставить двигатель механического насоса. Последовательность операций обратная п.2.
18. Залить масло из корпуса механического насоса. Для этого завернуть винт сливного отверстия, открутить винт заливного отверстия и наливать вакуумное масло через воронку до достижения его уровня середины смотрового окошка уровня масла. Закрутить заливной винт.

### **Контрольные вопросы**

1. К чему может привести попадание влаги в механический насос?

2. К чему может привести и почему уменьшается уровень масла в насосе?
3. Принцип действия пластинчато-роторных насосов?
4. Принцип работы пластинчато-статорных насосов?
5. Требования, предъявляемые к рабочим жидкостям насосов?
6. Величина предельного вакуума достигаемого механическим насосом и чем он ограничен?
7. За счет чего осуществляется герметизация в механических насосах?
8. Работа газобалластного устройства.

## **Лабораторная работа №2**

### **Диффузионные насосы**

**Цель работы:** Ознакомиться с устройством и работой вакуумных диффузионных насосов. Изучить процесс откачки высокого вакуума на типовом оборудовании.

**Приборы и оборудование:** пост вакуумный УВН-2М, вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-2, лампа вакуумная термопарная ПМТ-2, лампа вакуумная ионизационная ПМИ-2 диффузионный насос Н 250/2500.

### **1. Общие сведения**

## 1. Принцип действия

Принципиальная схема струйного насоса, работа которого основана на откачивающем действии паровой струи, показана на рис. 1.

Источником пара является рабочая жидкость (ртуть или вакуумное масло), залитая в кипятильник 2, которая нагревается до рабочей температуры нагревателем 1. Образующийся при нагреве пар по пароподводящей трубе 3 поступает в сопло 5, из которого с большой скоростью истекает в пространство рабочей камеры 6. Откачиваемый газ, поступающий через впускной патрубок 9, захватывается в рабочей камере струей и увлекается ею к охлажденным стенкам рабочей камеры, где пар конденсируется и конденсат по сливной трубе 8 возвращается в кипятильник, а газ, сжатый струей, выбрасывается через выпускной патрубок 10 и откачивается форвакуумным насосом.

Механизм увлечения газа паровой струей в пароструйных насосах поясняется рис. 2. В эжекторных насосах при высоком давлении откачиваемого газа ( $10^5$ — $10$  Па) пар в струе на выходе из сопла должен иметь высокую плотность, чтобы при взаимодействии с откачиваемым газом струя не разрушалась.

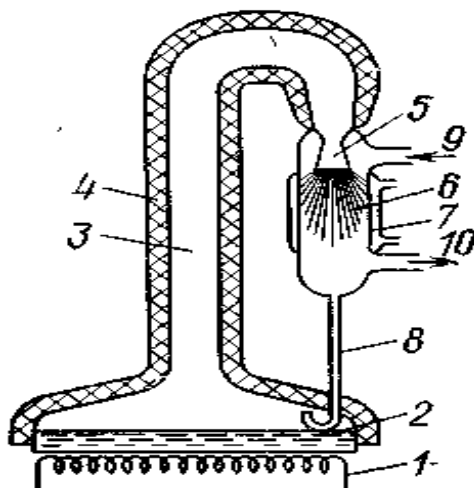


Рис. 1. Принципиальная схема струйного вакуумного насоса. 1 — нагреватель; 2 — кипятильник с рабочей жидкостью; 3 — пароподводящая труба; 4 — теплоизоляция; 5 — сопло; 6 — рабочая камера насоса; 7 — холодильник; 8 — трубка для стока конденсата в кипятильник; 9 — впускной патрубок; 10 — выпускной патрубок

В струйных насосах, откачивающих газ с давлением  $10\text{--}10^{-1}$  Па, струя не разрушается при меньшей плотности пара в ней. В данном случае увлечение откачиваемого газа струей пара происходит в результате трения между поверхностью струи пара и прилегающими к ней слоями газа (вязкостный захват), а также вследствие частичной диффузии молекул газа в приповерхностную часть струи (зона струи, ограниченная пунктиром на рис. 2,а). Подобный механизм увлечения откачиваемого газа паровой струей используется в бустерных насосах.

При более низком давлении откачиваемого газа плотность струи пара может быть еще меньше, так как в механизме увлечения газа струей наряду с вязкостным захватом все большую роль начинает играть диффузия газа в струю.

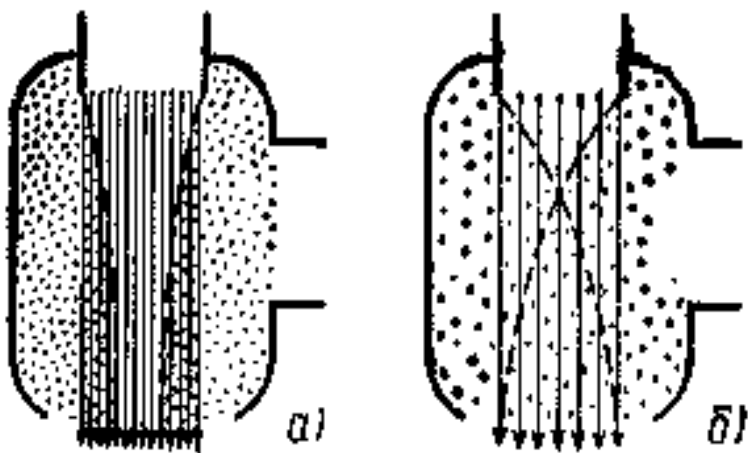


Рис. 2. Способы увлечения газа паровой струей в пароструйных насосах. а — диффузия газа в плотную струю с вязкостным захватом в бустерных насосах при давлении газа  $10—10^{-1}$  Па; б — диффузия молекул газа в струю малой плотности в диффузионных насосах при давлении газа около  $10^{-2}$  Па

Наконец, при давлении откачиваемого газа меньше  $10^{-2}$  Па, когда длина свободного пути его молекул становится соизмеримой с размерами рабочей камеры насоса, роль вязкостного захвата газа становится малой, и механизм увлечения газа целиком определяется диффузией молекул газа в струю (рис. 2,б). В этих условиях молекулы в результате столкновений с частицами пара получают составляющую скорости в направлении движения струи. Подобный механизм увлечения откачиваемого газа паровой струей используется в высоковакуумных диффузионных насосах.

## 1.2. Конструкции и характеристики

Диффузионные насосы предназначены для работы в области высокого и сверхвысокого вакуума, т. е. при

давлениях ниже  $10^{-1}$  Па. Отличительной особенностью характеристики диффузионных насосов является постоянство скорости действия в рабочем диапазоне давлений.

Конструкции паромасляных диффузионных насосов имеют ряд особенностей, связанных с использованием в качестве рабочих жидкостей масла или сложных эфиров. Это прежде всего устройства, обеспечивающие фракционирование (т. е. разделение на фракции) неоднородных масел, причем тяжелые фракции (с низким давлением насыщенного пара) направляются в сопло первой (высоковакуумной) ступени, чем обеспечиваются низкое предельное остаточное давление и высокое быстродействие насоса в целом, а легкие фракции (с высоким давлением насыщенного пара) направляются в сопло последней ступени, обеспечивая высокое выпускное давление. Насосы с таким устройством называются фракционирующими или разгонными. На рис. 3,а показано устройство металлического высоковакуумного фракционирующего диффузионного насоса. Сварной корпус 1 насоса выполнен из малоуглеродистой стали с наваренной на него рубашкой водяного охлаждения. Паропровод 2 с двумя зонтичными соплами изготовлен из алюминия. Последней выходной ступенью насоса является эжектор 3.

Фракционирование масла, стекающего в кипятильник по стенке корпуса, осуществляется с помощью лабиринтных колец, удлиняющих путь масла (рис. 3,б) до поступления в центральную зону кипятильника, откуда питается паром высоковакуумное сопло, так что легкие фракции масла успевают испариться на периферии кипятильника, откуда они поступают во второе зонтичное и эжекторное сопла насоса.

В не прогреваемых вакуумных системах с резиновыми уплотнителями паромасляные диффузионные насосы обеспечивают предельное остаточное давление около  $5 \cdot 10^{-4}$  Па без ловушек и около  $5 \cdot 10^{-5}$  Па с ловушками, охлаждаемыми кипящим жидким азотом. Характерная зависимость скорости

действия диффузионного насоса ( $S_H=500$  л/с) от впускного давления приведена на рис. 4.

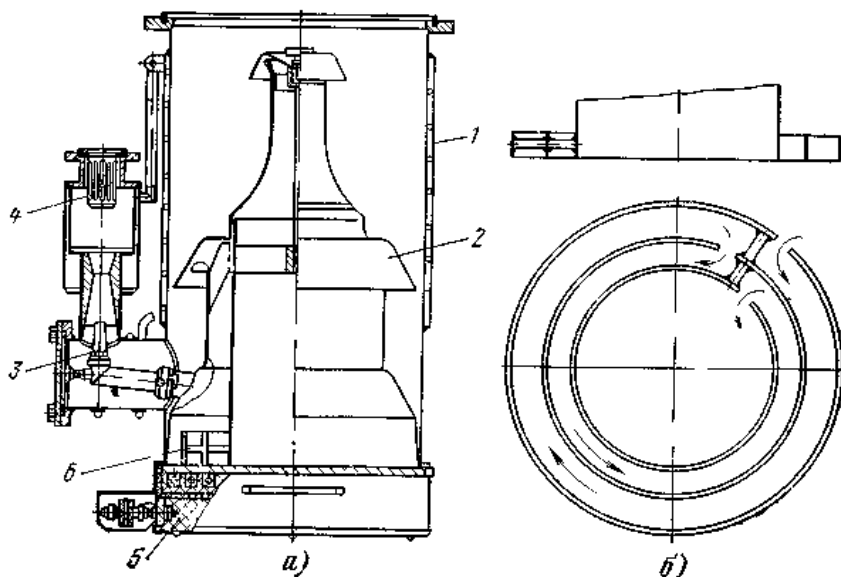


Рис. 3. Высоковакуумный диффузионный насос (а) и устройство для фракционирования масла (б) 1 — корпус; 2 — паропровод; 3 — эжекторное сопло; 4 — ловушка для паров масла, 5 — электронагреватель; 6 — лабиринтные кольца.

Предельное остаточное давление пароструйного диффузионного насоса в значительной мере определяется качеством фракционирования масла и содержанием газов в масле, стекающем в кипятыльник, так как чем лучше обезгажено масло, тем меньше газов заносится паровой струей на впуск насоса. Лабиринтные кольца, показанные на рис. 3,б, не прилегают плотно к днущу кипятыльника, в связи с чем не обеспечивают достаточно полного фракционирования масла. Для улучшения фракционирования масла в современных насосах лабиринтные кольца выполняют непосредственно в

днище кипятильника, а паропроводящие трубы сопел плотно надеваются на перегородки соответствующих каналов лабиринтных колец. Обезгаживание масла в насосах улучшено тем, что нижняя часть корпуса не охлаждается (для этого водяную рубашку укорачивают), так что температура масла в нижней части достигает  $140^{\circ}\text{C}$ , а также благодаря удлинению пути конденсата в горячей зоне, для чего на стенке корпуса ниже выпускного патрубка предусмотрена винтовая канавка, по которой конденсат стекает в кипятильник (рис. 5).

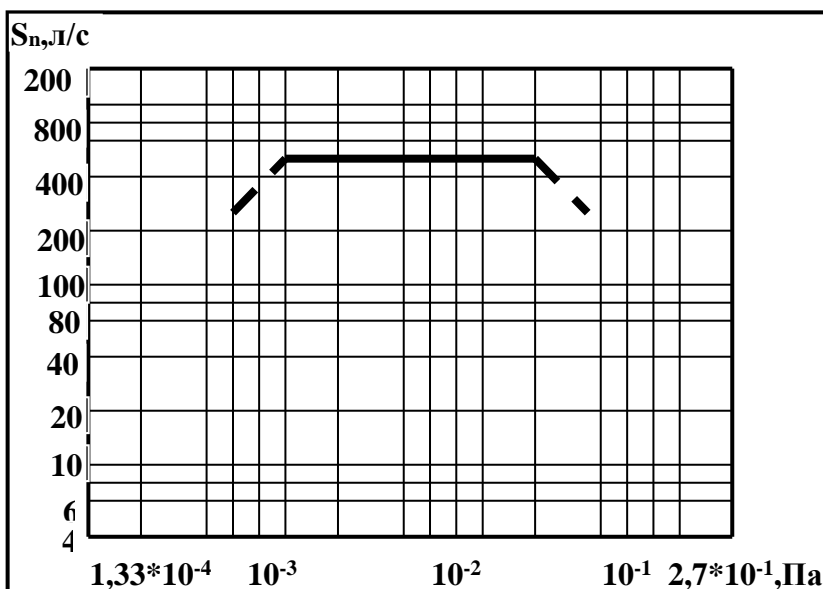


Рис. 4. Зависимость быстроты действия паромасляного диффузионного насоса от впускного давления.

Насос с улучшенным фракционированием и обезгаживанием способен на обычном минеральном масле без



применения азотной ловушки создавать предельное остаточное давление  $1 \cdot 10^{-6}$  Па.

Ухудшение условий охлаждения насоса при повышении температуры воды ведет к заметному повышению предельного остаточного давления и уменьшению быстроты действия.

Проведенное рассмотрение показывает, что основные характеристики паромасляных насосов определяются как конструкцией насоса, так и родом рабочей жидкости.

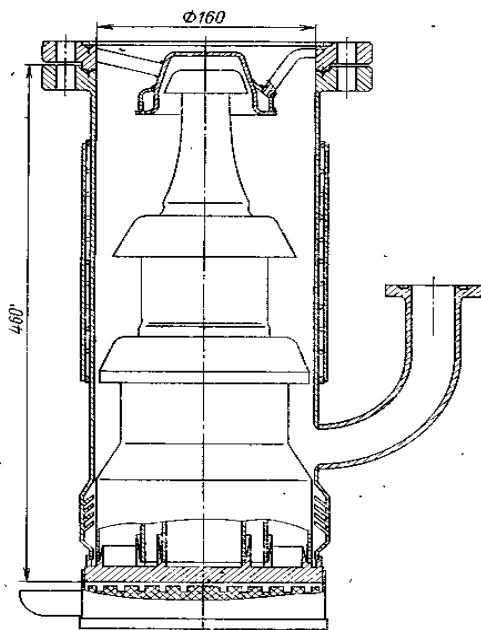


Рис. 5. Сверхвысоковакуумный паромасляный диффузионный насос с улучшенным фракционированием и обезгаживанием масла

На рис 6. показано влияние мощности подогрева на характеристики насосов. У всех насосов существует порог мощности подогрева 1, ниже которого насос не работает совсем. Кривая 2 показывает, что наибольшее выпускное давление  $p_{\text{наиб}}$  возрастает по мере увеличения мощности подогрева, это объясняется увеличением плотности струи.

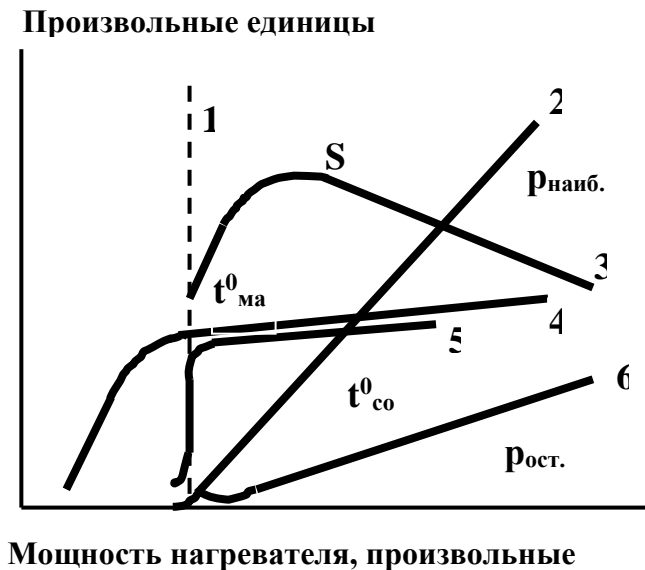


Рис. 6. Изменение характеристик паромасляных диффузионных насосов в зависимости от мощности подогрева 1 — порог, 2 — наибольшее выпускное давление, 3 — быстрота действия, 4 — температура масла в кипятильнике, 5 — температура сопл, 6 — предельное остаточное давление

Предельное остаточное давление  $p_{ост}$  (кривая 6) вначале уменьшается, что связано с уменьшением противодиффузии газов через струю по мере увеличения плотности струи, и у паромасляных диффузионных насосов проходит через минимум, лежащий вблизи пороговой мощности подогрева, дальнейшее увеличение предельного остаточного давления объясняется разложением масла в кипятильнике и заносом образующихся легких фракций в сопло первой ступени. Заметим, что в парортутных насосах этого не происходит.

Быстрота действия  $S_H$  (кривая 3) проходит через максимум, что связано с изменением плотности струи.

Основные характеристики пароструйных диффузионных насосов существенно зависят от молекулярной массы откачиваемого газа, что связано с большим коэффициентом диффузии у легких газов (водород, гелий) через паровую струю, чем у тяжелых газов (аргон, азот). На рис. 7. показано влияние выпускного давления азота и водорода на предельное остаточное давление.

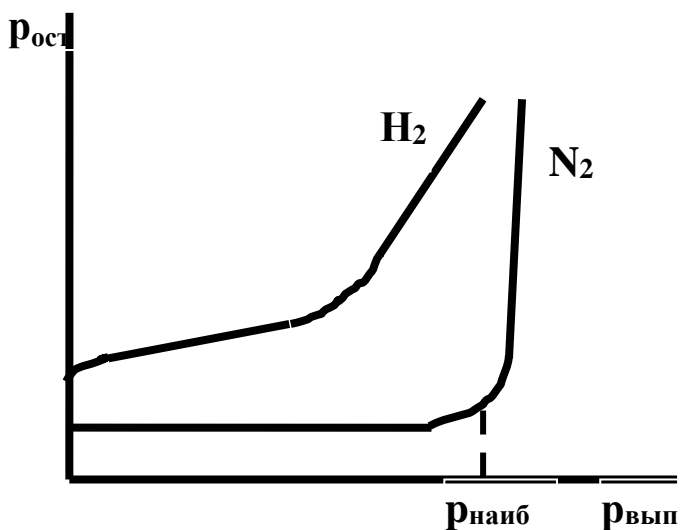


Рис. 7. Изменение предельного остаточного давления в паромасляном диффузионном насосе в зависимости от выпускного давления для азота  $N_2$  и водорода  $H_2$

Увеличение выпускного давления азота в довольно широких пределах не влияет на предельное остаточное давление; только при превышении наибольшего для данного

насоса выпускного давления  $P_{\text{наиб}}$  происходит резкое повышение давления на впуске, и насос прекращает работу. Увеличение выпускного давления водорода сразу же сказывается на предельном остаточном давлении насоса.

Теоретическая быстрота действия  $S_T$  паровой струи при молекулярном режиме течения газа определяется проводимостью входного сечения насоса.

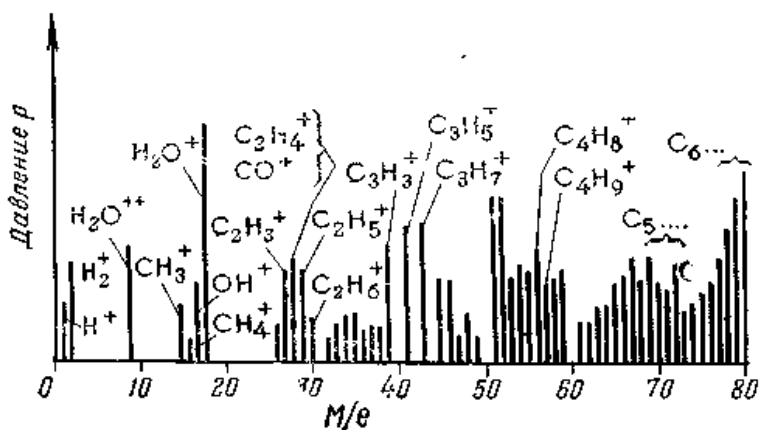


Рис. 8. Участок спектра масс остаточных газов паромасляного диффузионного насоса с водоохлаждаемой ловушкой; рабочая жидкость — полифенилметилсилоксан.

Истинная быстрота действия насоса  $S_H$  за счет отражения части молекул от струи и противодиффузии газа меньше теоретической  $S_T$ ; отношение  $S_H/S_T = \alpha$  зависит от рода газа и составляет обычно для воздуха 0,3—0,5.

Быстрота действия диффузионных насосов уменьшается как в области высоких давлений, так и в области предельного остаточного давления (рис. 4).

Уменьшение быстроты действия диффузионного насоса в области высоких давлений объясняется возрастанием выпускного давления (из-за ограниченности быстроты

действия форвакуумного насоса) и нарушением работы паровой струи. Уменьшение быстроты действия в области предельного остаточного давления связано с возрастающим влиянием заноса газа в верхнее сопло и противодиффузии газа через струю.

Состав остаточных газов паромасляного диффузионного насоса представляет собой широкий набор углеводородных соединений с массовыми числами до 250. На рис. 8 показан участок спектра масс остаточных газов такого насоса до массового числа 80. С помощью эффективных ловушек из состава остаточных газов могут быть исключены практически все углеводородные соединения.

Обратный поток паров масла, поступающий в единицу времени с единицы площади сечения впускного патрубка диффузионного насоса, работающего без ловушки, составляет обычно  $1—5 \text{ мг}/(\text{ч}\cdot\text{см}^2)$ . С помощью эффективных ловушек эта величина может быть уменьшена до  $10^{-5}—10^{-6} \text{ мг}/(\text{ч}\cdot\text{см}^2)$ . Резкие непродолжительные увеличения обратного потока паров масла имеют место в периоды запуска и остановки насоса, когда паровая струя еще не сформировалась или уже потеряла форму.

Часто диффузионный насос с затвором, маслоотражателем и ловушкой выполняется как единая вакуумная установка, которая называется вакуумным агрегатом.

### **1.3. Практические указания по эксплуатации**

Струйные насосы должны эксплуатироваться только с рекомендованной рабочей жидкостью, для которой заводом-изготовителем (разработчиком) выбраны критические проходные сечения сопел и режим эксплуатации. Эксплуатационные мероприятия сводятся в основном к сохранению количества и качества рабочей жидкости в насосе и к мерам защиты откачиваемого сосуда от чрезмерного проникновения в него паров масла. Для этого следует

придерживаться обычной последовательности операций при запуске насоса: откачать пароструйный насос форвакуумным насосом, включить подачу охлаждающей воды, включить нагреватель (при этом возможно небольшое увеличение давления за счет газовыделения из разогревающегося масла); после запуска насоса (через 30—60 мин в зависимости от его размеров) охладить азотную ловушку и медленно открыть затвор или кран на входе насоса (при этом давление в откачиваемом сосуде должно быть не выше рекомендованного начального давления). Остановка насоса всегда начинается с закрытия затвора, затем размораживается азотная ловушка и после этого выключается нагреватель. Форвакуумная откачка и водяное охлаждение прекращаются после охлаждения кипятильника, которое можно ускорить, сняв нагреватель и обдувая кипятильник воздухом. В некоторых насосах в днище кипятильника имеются каналы водяного охлаждения, что значительно сокращает время охлаждения насоса.

Рассмотрим аварийные ситуации. При разгерметизации откачиваемого сосуда или прекращении подачи охлаждающей воды должен быть перекрыт затвор на впуске насоса и отключен нагреватель; форвакуумная откачка при этом продолжается.

При аварийной остановке форвакуумного насоса должны быть перекрыты форвакуумный кран и затвор на впуске, а также отключен нагреватель.

При выходе из строя нагревателя должен быть перекрыт затвор на впуске.

Работа нагревателя при повышенном давлении в насосе (например, если забыли включить форвакуумную откачку или при аварии в форвакуумной системе некоторое время не был отключен нагреватель) ведет к перегреву рабочей жидкости. В таких случаях следует до начала форвакуумной откачки дать рабочей жидкости несколько остыть, отключив нагреватель, в противном случае бурное вскипание перегретой рабочей жидкости приводит к сильным выбросам ее из насоса.

Некоторый унос рабочей жидкости в форвакуумную коммуникацию происходит при прохождении через разогретый насос больших потоков газа.

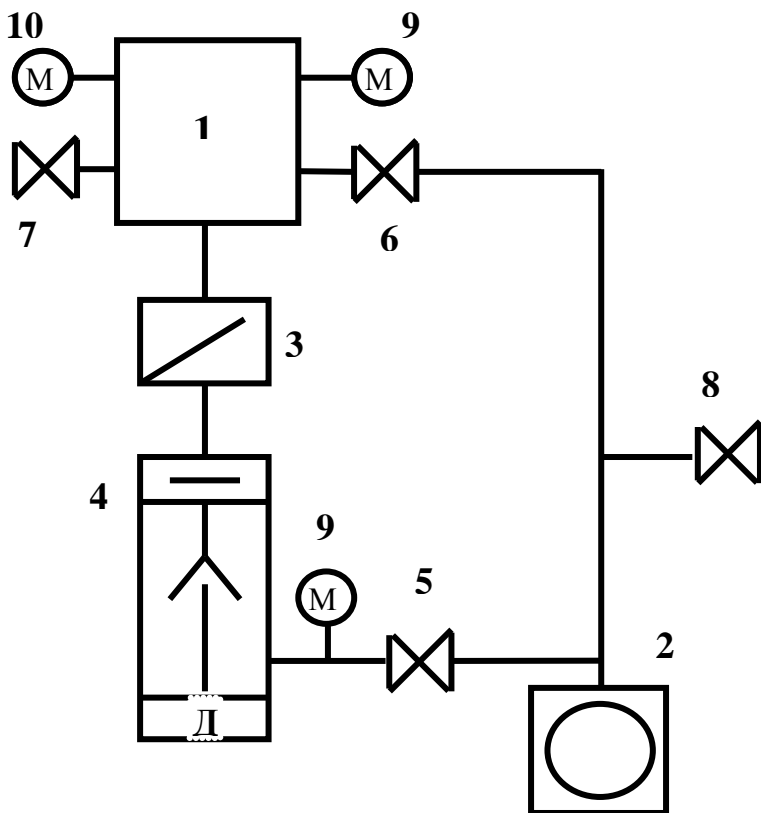


Рис. 9 Высоковакуумный откачный пост. 1- вакуумная камера, 2- механический насос, 3- высоковакуумный клапан, 4 – диффузионный насос, 5 - клапан механический –

диффузионный насос, 6 - клапан механический насос - камера, 7 – натекаТЕЛЬ в камеру, 8 – натекаТЕЛЬ в магистраль механического насоса, 9 – низковакуумный термопарный манометр, 10 – высоковакуумная ионизационная лампа

### **Порядок выполнения работы**

1. Разобрать диффузионный насос Н 250/2500. Обратить особое внимание на устройства корпуса, паропровода, эжекторного сопла, ловушки для паров масла, электронагревателя, лабиринтного кольца.
2. Собрать насос.
3. Ознакомиться с инструкцией на аппаратуру входящую в состав вакуумной установки.
4. Открыть воду на охлаждение рубашки диффузионного насоса.
5. Включить механический насос (рис.9, поз.2).
6. Через несколько минут открыть клапан между механическим насосом и диффузионным (рис.9, поз.5).
7. Включить вакуумметр и по термопарной вакуумной лампе (рис.9, поз.9) провести контроль процесса откачки предварительного вакуума из диффузионного насоса до давления не хуже чем  $10^{-2}$  торр.
8. Включить нагреватель диффузионного насоса.
9. Закрыть клапан между механическим насосом и диффузионным (рис.9, поз.5).
10. Открыть клапан механический насос – камера (рис.9, поз.6).
11. Включить вакуумметр и по термопарной вакуумной лампе (рис.9, поз.9) провести контроль процесса откачки предварительного вакуума из камеры до давления не хуже чем  $5 \cdot 10^{-2}$  торр.

*Примечание: Во время откачки камеры следить за давлением в диффузионном насосе при уменьшении давления ниже  $10^{-1}$  торр переключить откачку на насос.*



12. Закрыть клапан механический насос – камера (рис.9, поз.6).
13. Открыть клапан между механическим насосом и диффузионным (рис.9, поз.5).
14. Вывести диффузионный насос на рабочий режим ( 30 мин. разогрева печи).
15. Повторить п. 9-13.
16. Открыть клапан между диффузионным насосом и камерой (рис.9, поз.3).
17. Провести процесс откачки в течении 10 мин.
18. Включить вакуумметр и по высоковакуумной ионизационной лампе (рис.9, поз.10) провести контроль процесса откачки из камеры до давления не хуже чем  $5 \cdot 10^{-5}$  торр.
19. Закрыть клапан между диффузионным насосом и камерой (рис.9, поз.3).
20. Выключить нагреватель диффузионного насоса.
21. Остудить диффузионный насос в течении 30 мин.
22. Закрыть клапан между механическим насосом и диффузионным (рис.9, поз.5).
23. Выключить механический насос.
24. Напустить в магистраль механического насоса воздух.
25. Закрыть воду на охлаждение рубашки диффузионного насоса.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие марки масел применяют в диффузионных насосах.
2. Каков механизм захвата молекул откачиваемого газа в струю пара из сопла в диффузионном насосе?
3. Как изменяются характеристики насосов при попадании в горячее масло атмосферного воздуха?
4. Чем обусловлено требование запуска диффузионных насосов при давлении более  $10^{-2}$  торр?

5. Какие процессы происходят в высоковакуумном насосе непосредственно после выключения нагревателя?
6. Чем определяется нестабильность работы диффузионных насосов?
7. Чем определяется выпускное давление промасленного насоса?
8. Как изменяются характеристики насосов при изменении мощности нагревателя?

## Приложение 1

### Рабочие жидкости вакуумных насосов

Табл 1

Рбочие жидкости	ГОСТ, ТУ	Давление Насыщенных паров при 293 К, Па	Кинематическая вязкость при 323К, $10^5 \text{ м}^2/\text{с}$	Предельное давление насоса, Па	Плотность при 293 К, $\text{кг}/\text{м}^3$	Молярная масса, $\text{кг}/\text{кмоль}$	Окислительная стойкость
ВМ-1	ГОСТ 5.671-70	$3 \cdot 10^{-7}$ $\dots 5 \cdot 10^{-6}$	65...69	$3 \cdot 10^{-4}$	870	450	Низкая
ВМ-2	ГОСТ 5.671-70	$3 \cdot 10^{-7}$ $\dots 5 \cdot 10^{-6}$	65...69	$4 \cdot 10^{-4}$	870	450	Низкая
ВМ-5	МРТУ 38-1	$1 \cdot 10^{-8}$ $\dots 1 \cdot 10^{-6}$	68...74	$1 \cdot 10^{-6}$	870	450	Низкая
ПЭС-В-1	ГОСТ16 480-70	$< 6 \cdot 10^{-6}$	16...33	$3 \cdot 10^{-4}$	970	700	Высокая
ПЭС-В-2	ГОСТ16 480-70	$1 \cdot 10^{-5}$ $\dots 1 \cdot 10^{-4}$	16...33	$2 \cdot 10^{-4}$	970	700	Высокая
ПФМС/ 5л	ТУ 6-02-777-73	$6 \cdot 10^{-7}$ $\dots 9 \cdot 10^{-5}$	8...13	$3 \cdot 10^{-4}$	1060	700	Высокая
ФМ-1	ТУ 02-758-73	$1 \cdot 10^{-8}$	35...37	$5 \cdot 10^{-8}$	1096	547	Средняя
5Ф4Э	ТУ 609-447-70	$1 \cdot 10^{-9}$	130	$9,4 \cdot 10^{-7}$	1200	446	Средняя

Основные характеристики диффузионных насосов Таблица2

Основные характеристики	Тип насосов									
	Н-0,025-2	НВО-40М	НВД-0,15	НВД-0,25	НВДС-100	Н100/350	Н160/700	Н250/2500	Н400/7000	Н630/18000
Диапазон рабочих давлений, Па	10 <sup>-4</sup> ...10	10 <sup>-5</sup> ...5	10 <sup>-3</sup> ...7	10 <sup>-3</sup> ...7	10 <sup>-4</sup> ...4	10 <sup>-4</sup> ...3	10 <sup>-4</sup> ...3	10 <sup>-4</sup> ...3	10 <sup>-4</sup> ...3	10 <sup>-4</sup> ...3
Быстрота откачки в рабочем диапазоне давлений, м <sup>3</sup> /с	0,01	0,04	0,08	0,12	0,24	0,31	0,64	2,15	5,60	16,5
Предельное остаточное давление, Па	1*10 <sup>-5</sup>	7*10 <sup>-4</sup>	3*10 <sup>-4</sup>	3*10 <sup>-4</sup>	1*10 <sup>-5</sup>	7*10 <sup>-5</sup>	7*10 <sup>-5</sup>	7*10 <sup>-5</sup>	7*10 <sup>-5</sup>	7*10 <sup>-5</sup>
Наибольшее выпускное давление, Па	92	40	66	66	40	27	33	27	27	27
Мощность нагревателя, кВт	0,23	0,45	0,45	0,5	0,6	0,5	0,8	2	4	9
Расход воды на охлаждение насоса, дм <sup>3</sup> /с	-	-	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,06	0,2
Количество рабочей жидкости, дм <sup>3</sup>	0,02	0,1	0,1	0,13	0,1	0,07	0,3	0,55	1,1	5,0
Диаметр выпускного патрубка, мм	40	62	85	100	100	100	160	250	400	630
Диаметр выпускного патрубка, мм	14	10	20	25	25	25	32	63	63	100
Габаритные размеры (длина)	-	283	295	320	275	275	425	705	859	1345
	-	200	200	210	180	170	260	330	526	1015

х ширина х высота), мм	40	302	350	421	360	310	370	588	762	1300
Масса, кг	-	8	9	14	8	6,5	16	31,5	80	280

## **Лабораторная работа №3**

### **Измерение остаточных давлений в вакуумных системах**

**Цель работы:** Ознакомиться с устройством и работой термопарного ПМТ-2 и ионизационного ПМИ-2 вакуумных преобразователей. Изучить работу вакуумметра ВИТ-2, процесс юстировки термопарной ПМТ-2 лампы.

**Приборы и оборудование:** пост вакуумный УВН-2М, вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-2, лампа вакуумная термопарная ПМТ-2, лампа вакуумная ионизационная ПМИ-2.

### **1. Общие сведения**

#### **1.1. Классификация методов и приборов для измерения общих давлений**

Область давлений, используемая в современной вакуумной технике,  $10^5 \dots 10^{-12}$  Па. Измерение давлений в таком широком диапазоне не может быть обеспечено одним прибором. В практике изменения давления разреженных газов применяются различные типы преобразователей, отличающиеся по принципу действия и классу точности.

По принципу действия вакуумметры можно свести в следующие классы:

- жидкостные, непосредственно измеряющие давление (U-образные вакуумметры и их модификации);

- компрессионные, действие которых основано на законе изотермического сжатия идеального газа (вакуумметр Мак-Леода);

- деформационные, использующие в качестве чувствительного элемента сильфон, мембрану и т. п., в которых деформация чувствительного элемента служит мерой давления;

- тепловые вакуумметры, использующие зависимость теплопроводности газа от давления; они подразделяются на термопарные и вакуумметры сопротивления;

- ионизационные, в которых используется ионизация газа; большая группа приборов этого класса подразделяется в свою очередь на:

а) электроразрядные, принцип действия которых основан на зависимости параметров электрического разряда в разреженном газе от давления;

б) электронные ионизационные, ионизация газа в которых осуществляется потоком электронов, ускоряемых электрическим полем.

Области давлений, измеряемые вакуумметрами, показаны на рис. 1, а в табл. 1 приведены их основные характеристики.

Всю группу вакуумметров можно также разделить на приборы прямого и косвенного действия.

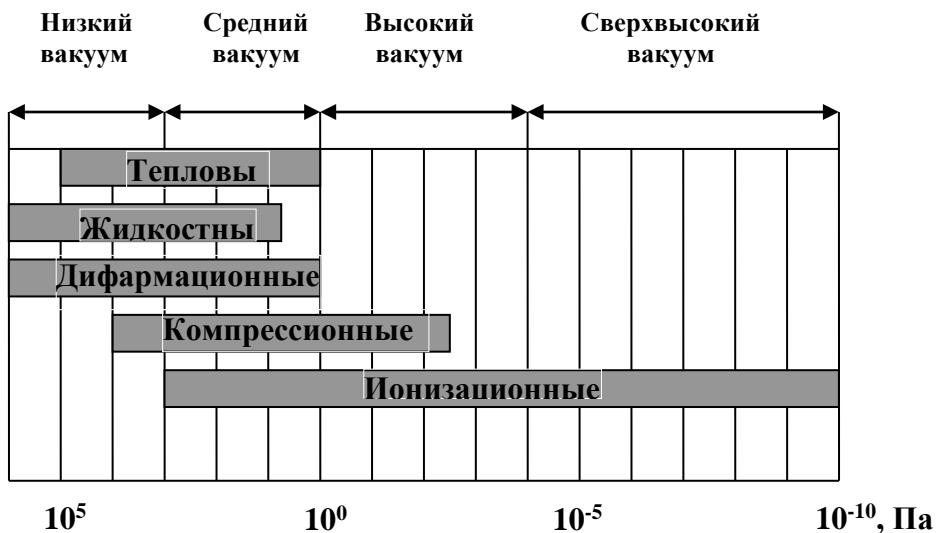



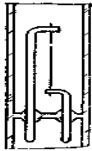
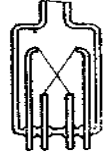




Рис. 1. Области давлений, измеряемые вакуумметрами.

Основные характеристики вакуумметров

Таблица 1

Тип вакуумметра	Принципиальное устройство	Диапазон измерений, Па	Применение
Жидкостные		$10—10^5$	Лабораторная практика, метрология
Компрессионные		$10^{-3}—10^3$	Метрология вакуумная
Деформационные		$1—10^5$	Низковакуумное оборудование

Тепловые сопротивления		$10^{-1}—10^5$	Технологические вакуумные установки
Тепловые термопарные		$10^{-1}—10^3$	То же
Электронные ионизационны е		$10^{-8}—10^2$	Технологические вакуумные установки
Магнитные Электрораз- рядные		$10^{-10}—10^{-2}$	Автоматизированн ые системы высокого и сверхвысокого вакуума

Вакуумметрами прямого действия являются приборы, которые непосредственно измеряют давление газа. Метрические свойства этих вакуумметров можно заранее рассчитать или получить с помощью градуировки по динамометрическим приборам. Отсчет давления вакуумметров прямого действия принципиально не зависит от состава газа и его температуры. Эти приборы перекрывают диапазон  $10^5—10^{-3}$  Па, причем их относительная погрешность тем меньше, чем выше давление.

К вакуумметрам прямого действия относятся: жидкостные, компрессионные и деформационные манометры.

Вакуумметры косвенного действия измеряют не само давление, а некоторую его функцию и состоят из манометрического преобразователя и измерительного блока. Отсчет давления (выходной сигнал) у вакуумметров косвенного действия зависит от состава газа и его температуры.

Вакуумметры косвенного действия способны измерять давления от атмосферного до  $10^{-10}$  Па. К этим вакуумметрам относятся тепловые и ионизационные приборы.

## 1.2. Тепловые преобразователи

Принцип действия тепловых преобразователей основан на зависимости теплопередачи через разреженный газ от давления. Передача теплоты происходит от тонкой металлической нити к баллону, находящемуся при комнатной температуре. Металлическая нить нагревается в вакууме путем пропускания электрического тока.

Уравнение теплового баланса такого прибора можно представить в следующем виде:

$$I_H^2 R = E_K + E_T + E_I + E_M \quad (1)$$

где  $I_H$  — ток, проходящий через нить,  $R$  — сопротивление нити,  $E_K$ ,  $E_T$ ,  $E_I$ ,  $E_M$  — потери теплоты за счет конвекции, теплопроводности газа, излучения нити и теплопроводности материала нити.

Конвективным теплообменом в области среднего и высокого вакуума можно пренебречь, т.е.  $E_K \approx 0$ , а потери теплоты излучением

$$E_T = K_I (T_H^4 - T_B^4) A,$$

здесь  $A$  — площадь поверхности нити,  $K_I$  — коэффициент излучения материала нити,  $T_H$  и  $T_B$  — температуры нити и баллона.

Тепловые потери нити за счет передачи теплоты по материалам нити и электродов, соединяющих нить с корпусом преобразователя,

$$E_M = b(T_H - T_B) f,$$

где  $b$  — коэффициент теплопроводности материала нити,  $f$  — сечение нити.

Потери теплоты через газовый промежуток

$$E_T = \lambda(T_H - T_B) A, \quad (2)$$



где  $\lambda = \frac{Ap}{p+B}$  — коэффициент теплопроводности газа.

В области низкого вакуума  $p \gg B$ , а коэффициент теплопроводности газа не зависит от давления. Давление  $p \approx B$ , соответствующее переходу от среднего в низкий вакуум, является верхним пределом измерения теплового манометра. В области высокого вакуума, когда  $p \ll B$ , коэффициент теплопроводности пропорционален давлению и при  $a = 1$  из следует

$$\lambda = K_T p. \quad (3)$$

Измерительное уравнение теплового преобразователя с учетом уравнений (1), (2), (3) можно записать так:

$$p = \frac{I_H^2 R - (E_H + E_M)}{K_T (T_H - T_B)}. \quad (4)$$

Для точного измерения давления необходимо, чтобы  $E_T$  составляло значительную долю от  $E_H + E_M$ , т. е. чтобы сумма  $E_H + E_M$  была существенно меньше мощности  $I_H^2 R$ , выделяющейся в нити манометра. Поэтому условие  $I_H^2 R - (E_H + E_M) \gg 0,01 I_H^2 R$  определяет нижний предел измерения манометра.

Из уравнения (4) видно, что давление является функцией двух переменных: тока накала нити  $I_H$  и температуры нити  $T_H$ .

Существует два метода работы тепловых манометров: постоянной температуры нити и постоянного тока накала. Градуировочные кривые теплового манометра, показанные на рис. 2, а, б для обоих методов работы, представляют собой в средней части параболу и гиперболу. Концы градуировочных кривых у верхнего и нижнего пределов измерения не описываются уравнением (4) и переходят в линии, параллельные оси давления.

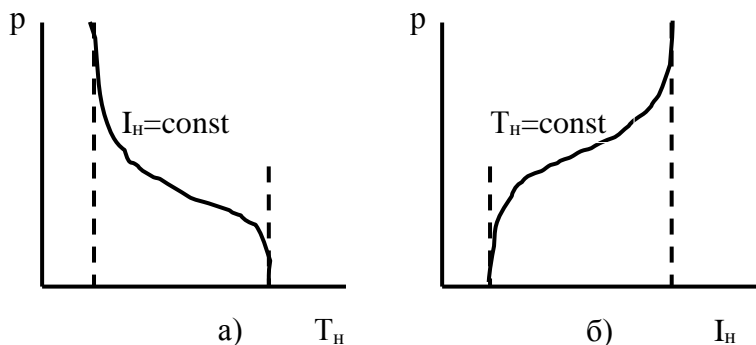


Рис.2. Градуировочные кривые теплового преобразователя: а — при постоянном токе накала; б — при постоянной температуре нити

Для расширения верхнего предела измерения теплового преобразователя следует уменьшать его габариты, что увеличивает отношение  $L/d$  и сдвигает границу низкого вакуума в сторону более высоких давлений. Зависимость коэффициента конвективного теплообмена от давления используется для измерения давлений в области низкого вакуума. Недостатком этого способа является зависимость показания прибора от его положения в пространстве.

Нижний предел измерения тепловых преобразователей можно улучшить уменьшая долю  $(E_{и}+E_{м})$  в сумме тепловых потерь нити. Это может быть достигнуто при понижением температуры нити и уменьшением диаметра вводов, соединяющих нить с баллоном.

Показания тепловых преобразователей определяются соотношением  $K_{Tr}$  и зависят от рода газа. Преобразователь будет давать одинаковые показания при выполнении следующих условий:

$$p_1 K_{T1} = p_2 K_{T2} = \dots = p_i K_{Ti}$$

Выпускаемые промышленностью приборы проградуированы по сухому воздуху. Если необходимо измерить давление других газов, то нужно учитывать относительную чувствительность прибора к данному газу

$$p_i = p_B \frac{K_{TB}}{K_{Ti}} = p_B q_i, \quad (5)$$

где  $p_B$  и  $K_{TB}$  — давление и коэффициент теплопроводности воздуха,  $q_i = K_{TB}/K_{Ti}$  — коэффициент относительной чувствительности теплового преобразователя к данному газу.

Значения  $q_i$  для различных газов по отношению к воздуху могут отличаться в несколько раз.

Если преобразователь измеряет давление смеси газов, то его показания будут выражены в воздушном эквиваленте  $p_B$ :

$$p_1 K_{T1} + p_2 K_{T2} + \dots + p_n K_{Tn} = p_B K_{TB}. \quad (6)$$

Так как из определения относительной чувствительности (5) следует, что  $p_B = p_{CM}/q_{CM}$ , то выражение (6) можно записать в виде

$$p_{CM}/q_{CM} = p_1/q_1 + p_2/q_2 + \dots + p_n/q_n.$$

Разделив обе части уравнения на  $p_{CM}$ , получим

$$\frac{1}{q_{CM}} = \frac{V_1}{q_1} + \frac{V_2}{q_2} + \dots + \frac{V_n}{q_n},$$

где  $V_1, \dots, V_n$  — объемные концентрации соответствующих

газов, причем  $\sum_{i=1}^n V_i = 1$ . Таким образом, коэффициент

относительной чувствительности для смеси газов определяется по формуле

$$\frac{1}{q_{CM}} = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{q_i}, \quad (7)$$

Тепловые преобразователи в зависимости от способа измерения температуры делятся на терморные и преобразователи сопротивления.

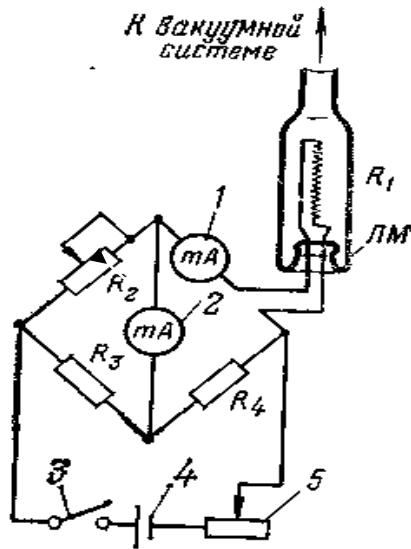


Рис.3. Манометрический преобразователь сопротивления и упрощенная схема измерительного блока. ЛМ — лампа манометрическая (преобразователь),  $R_1$  — сопротивление нити накала,  $R_2$  — переменный резистор,  $R_3$  и  $R_4$  — постоянные резисторы; 1 и 2 — миллиамперметры; 3 — выключатель; 4 — батарея, 5 — реостат

Простейшая конструкция манометрического преобразователя сопротивления представляет собой стеклянную или металлическую трубку, по оси которой натянута нить, нагреваемая пропусканием тока (рис. 3). Подводимая к нити накала электрическая энергия расходуется на нагрев газа, излучение и отвод тепла через электрические вводы. При низких давлениях баланс энергии может быть выражен уравнением

$$I^2 R_H (1 + \alpha \Delta T) = c_H p \Delta T + \sigma_H (T^4 - T_0^4) + b_H \Delta T, \quad (8)$$

где  $c_H p \Delta T$  — мощность, отводимая через газ, окружающий нить, к стенкам трубки,  $p$  — давление газа в преобразователе,  $\Delta T = T - T_0$ ,  $T$  — температура нити;  $T_0$  — температура окружающей среды,  $\sigma_H (T^4 - T_0^4)$  — мощность, рассеиваемая

нитью, вследствие излучения (по закону Стефана — Больцмана),  $b_H \Delta T$  — мощность, отводимая через подвеску нити и электрические вводы путем теплопроводности,  $I$  — ток нити накала,  $R_H$  — сопротивление нити накала при температуре  $T_0$ ,  $\alpha_n$  — температурный коэффициент сопротивления материала нити,  $c_H$ ,  $\sigma_n$ ,  $b_H$  — коэффициенты пропорциональности.

Давление  $p$  можно найти из уравнения (8):

$$p = \frac{I^2 R_H (1 + \alpha \Delta T) - b_H \Delta T - \sigma_H (T^4 - T_0^4)}{c_H \Delta T}. \quad (9)$$

Это уравнение описывает градуированную кривую преобразователя, причем об изменении давления можно судить как по изменению тока накала  $I$  нити при постоянстве температур  $T$  и  $T_0$ , так и по изменению температуры нити  $T$  при постоянном токе накала  $I$ .

### 1.3. Вакуумметры сопротивления (режим постоянства температуры)

На рис. 7 схематически изображены один из вариантов манометрического преобразователя сопротивления и упрощенная схема измерительного блока.

Манометрический преобразователь представляет собой стальную трубку, внутри которой на двух вводах натянута вольфрамовая нить накала.

Измерительная часть вакуумметра содержит мост для измерения сопротивлений.  $R_1$  — сопротивление нити манометрического преобразователя, обладающее большим температурным коэффициентом, чтобы изменение температуры нити достаточно резко сказывалось на сопротивлении  $R_1$ ,  $R_2$  — переменное сопротивление из материала с малым температурным коэффициентом, чтобы изменение температуры практически не сказывалось на нем,  $R_3$  и  $R_4$  — постоянные сопротивления также с очень малым температурным коэффициентом, причем  $R_3 = R_4$ . Обычно

сопротивления  $R_3$  и  $R_4$  изготавливают из манганина или константана.

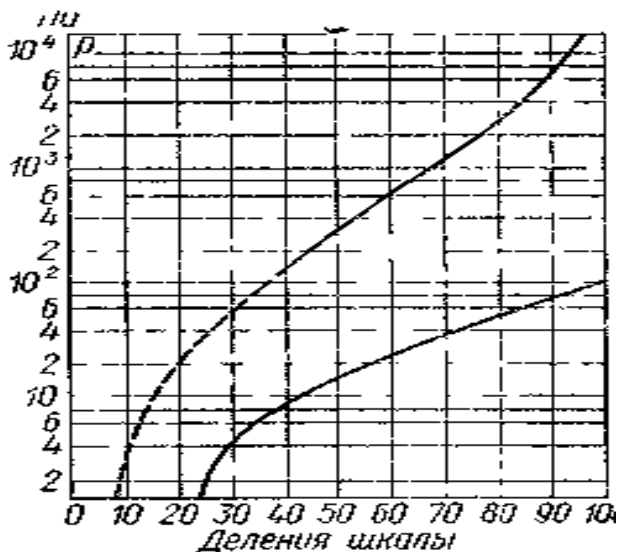


Рис. 4. Градуировочные кривые манометрического преобразователя сопротивления по воздуху. Верхняя сплошная кривая соответствует диапазону давлений  $4 \cdot 10^3$ —92 Па, нижняя сплошная кривая соответствует диапазону давлений 92—1 Па.

Измерение давления обычно проводят при постоянной температуре нити манометрического преобразователя. При изменении давления начинают меняться теплоотвод и, следовательно, температура нити.

Уменьшением тока накала  $I$  температуру нити возвращают к исходному значению и судят о давлении по значению тока  $I$ , который измеряют прибором 1.

Чтобы по положению стрелки на шкале прибора 1 измерить давление, вакуумметр заранее градуируется. На рис. 4 показаны градуировочные кривые одного из вакуумметров, из которых видно, что верхний предел измеряемых давлений, начиная с которого стрелка прибора начнет заметно

перемещаться, находится в области тысяч паскаль, а нижний предел достигает 1 Па.

#### **1.4. Термопарные вакуумметры (режим постоянства тока накала)**

На рис. 5 схематически изображены конструкция термопарного манометрического преобразователя и упрощенная схема измерительного блока. Манометрический преобразователь ЛМ представляет собой стеклянный или металлический корпус, в котором на двух вводах смонтирован платиновый или никелевый подогреватель 3, на двух других вводах крепится термопара 4, изготовленная из хромель — копеля или хромель — алюминия.

Термопара и подогреватель сварены через переключку П. Подогреватель нагревается током, который можно регулировать реостатом 5 и измерять миллиамперметром 1. Спай термопары, нагреваемый подогревателем, является источником термо-э. д. с., значение которой показывает милливольтметр 2.

Пока давление в вакуумной системе равно атмосферному, стрелка милливольтметра при заданном для данной манометрической лампы токе накала I стоит вблизи нуля. При понижении давления в системе стрелка начинает перемещаться в сторону увеличения термо-э. д. с., так как с уменьшением давления уменьшается теплопроводность газа и, следовательно, повышается температура переключки. Точность измерения давления термопарным вакуумметром существенно зависит от правильного подбора тока накала подогревателя. Ток накала подогревателя можно определить до вскрытия новой лампы (в случае стеклянного корпуса) или при откачке преобразователя до давления  $p < 1,3 \cdot 10^{-2}$  Па.

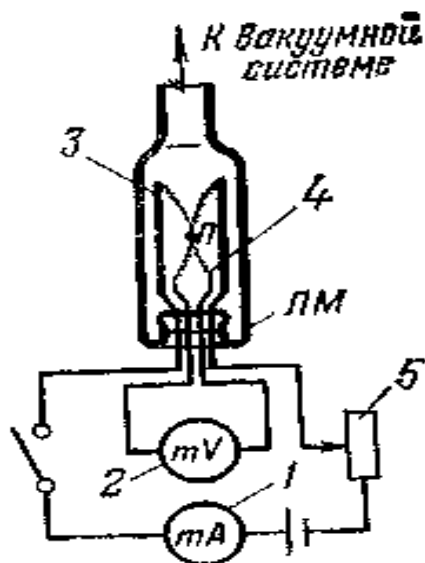


Рис. 5. Термопарный манометрический преобразователь и упрощенная схема измерительного блока ЛМ — лампа манометрическая (преобразователь), 1 — миллиамперметр; 2 — милливольтметр; 3 — подогреватель; 4 — термопара; 5 — реостат; П — общая точка подогревателя и термопары.

При этих давлениях теплоотвод по газу от подогревателя пренебрежимо мал и вся подводимая мощность расходуется на излучение (около 63%) и теплоотвод по вводам (около 37%). Ток подогревателя подбирают таким образом, чтобы стрелка милливольтметра точно совпадала с последним делением шкалы; при этом показания миллиамперметра (шкала «ток накала») будут соответствовать рабочему току подогревателя.

Градуировочные кривые одного из промышленных термопарных преобразователей по воздуху показаны на рис.6.

### 1.5 Особенности тепловых вакуумметров

Достоинствами тепловых вакуумметров являются возможность непрерывного наблюдения за изменением



давления в вакуумной системе, простота конструкции и их применимость к измерению давлений всех газов и паров. Как уже упоминалось, тепловые вакуумметры являются приборами косвенного действия, и их градуировочные кривые для различных газов различны и определяются теплопроводностью

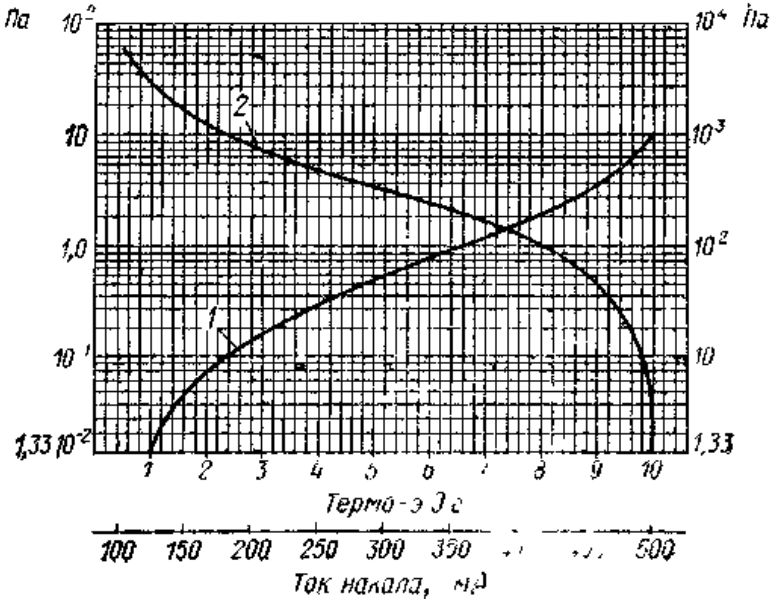


Рис.6. Градуировочные кривые для термопарного манометрического преобразователя по воздуху. 1 — градуировочная кривая для измерения давления в диапазоне  $6,6 \cdot 10^2$ —66 Па; 2 — градуировочная кривая для измерения давления в диапазоне 66— $1 \cdot 10^{-1}$  Па.

этих газов и коэффициентом температурной аккомодации молекул газа на нагревателе.

Тепловые вакуумметры не боятся прорывов атмосферы и имеют практически неограниченный срок службы. Загрязненные парами масла преобразователи очищаются промывкой в органическом растворителе. При наличии в газовой среде повышенной концентрации паров масел или воды между преобразователем и обследуемой системой

необходимо устанавливать низкотемпературную охлаждаемую ловушку.

Существенным недостатком тепловых вакуумметров является изменение тока накала нити с течением времени, что требует проведения периодической проверки тока накала. Некоторым недостатком тепловых вакуумметров является их относительная инерционность — задержка отсчета во времени при быстром изменении давления.

### 1.6. Электронные преобразователи

Принцип действия электронных преобразователей основан на пропорциональности между давлением и ионным током, образовавшимся в результате ионизации термоэлектронами остаточных газов.

Существует две схемы электронного преобразователя: с внутренним и внешним коллектором.

Схема с внутренним коллектором (рис. 7, а) аналогична обычному триоду. Коллектором ионов является сетка, на которую относительно катода подается отрицательное напряжение в несколько десятков вольт, а на анод — положительное напряжение 100—200 В. Электроны на пути от катода к аноду (ток  $I_e$ ) соударяются с молекулами остаточных газов, и образовавшиеся положительные ионы попадают на сетку, создавая ионный ток  $I_i$ , измеряемый гальванометром.

В схеме с внешним коллектором (рис. 7, б) потенциалы сетки и анода меняются местами, и коллектором становится анод. Электроны, летящие от катода к сетке, совершают вокруг ее витков ряд колебаний, что увеличивает длину траектории электронов и повышает вероятность ионизации молекул остаточных газов. Это делает схему с внешним коллектором более чувствительной, несмотря на то, что часть положительных ионов, образовавшихся между сеткой и катодом, не участвует в измерении давления.

Рассмотрим уравнение электронного преобразователя

$$dN = n p \varepsilon dr, \quad (10)$$

где  $dN$  — число положительных ионов,  $n$  — число электронов,  $dr$  — элементарная длина траектории электронов,  $\varepsilon$  — эффективность ионизации, равная количеству положительных ионов, образуемых одним электроном на единице пути при единичном давлении.

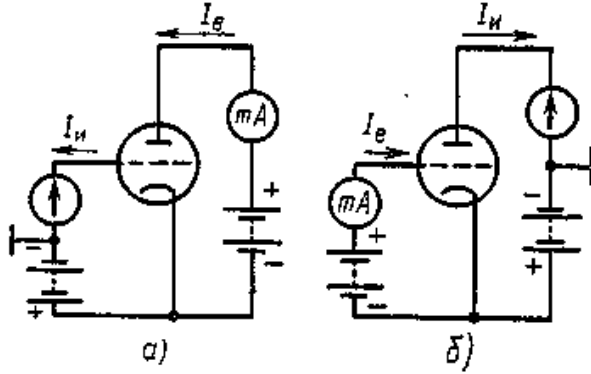


Рис. 7. Схемы электронных преобразователей: а — с внутренним коллектором, б — с внешним коллектором

Если ввести в (10) электронный ток  $I_e = n/t$ , то

$$\frac{dN}{t} = I_e p \varepsilon dr. \tag{11}$$

Интегрируя (11) по всей длине траектории электрона с энергией, большей потенциала ионизации, получим выражение для ионного тока

$$I_H = I_e p \int_{r_1}^{r_2} \varepsilon dr,$$

которое перепишем в виде

$$I_H = K_H I_e p \tag{12}$$

(  $K_H = \int_{r_1}^{r_2} \varepsilon dr$  — чувствительность электронного манометра ).

Из выражения (12), называемого уравнением электронного преобразователя, очевидно, что, для того чтобы измеряемый ионный ток был пропорционален давлению,

необходимо во время измерения поддерживать постоянное значение электронного тока. Тогда  $a = I_e K_{и}$  — постоянная электронного манометра — равна тангенсу угла наклона градуировочной кривой  $I_{и}(p)$  к оси давления.

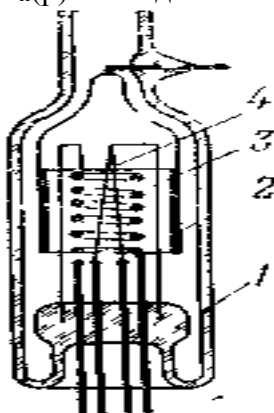


Рис. 8. Конструкция электронного ионизационного манометрического преобразователя. 1—стеклянный баллон; 2 — коллектор ионов; 3 — анодная сетка; 4 — катод.

Конструкция наиболее распространенного отечественного электронного ионизационного манометрического преобразователя показана на рис. 8. В стеклянном баллоне преобразователя 1 смонтирована трехэлектродная система, состоящая из коллектора ионов 2, анодной сетки 3 и прямоканального катода 4. На анодную сетку относительно катода подается напряжение  $-200$  В, а на цилиндрический коллектор ионов  $-50$  В. Анодная сетка преобразователя выполнена из вольфрамовой проволоки диаметром  $0,2$  мм в виде бифилярной спирали. При прогреве преобразователя для его обезгаживания по спирали пропускается ток  $3$  А.

Вольфрамовый катод преобразователя испускает электроны, которые движутся к аноду. Часть электронов пролетает сквозь анодную сетку и попадает в пространство, заключенное между анодной сеткой и коллектором. Так как

коллектор имеет отрицательный потенциал относительно катода, электроны не могут попасть на коллектор. В точке пространства с нулевым потенциалом электроны останавливаются и начинают движение в противоположном направлении — к положительно заряженной анодной сетке. В результате у сетки непрерывно колеблются электроны, причем прежде, чем попасть на анод, электроны совершают в среднем до 5 колебаний. При столкновении электронов с молекулами газа происходит ионизация молекул. Образовавшиеся положительные ионы собираются на находящемся под отрицательным потенциалом коллекторе, создавая в его цепи ионный ток.

Как показал опыт, при достаточно низких давлениях (обычно ниже 0,1 Па) отношение ионного тока  $I_{и}$  к электронному току  $I_e$  прямо пропорционально давлению газов  $P_{ИЗМ}$  в манометрическом преобразователе:

$$\frac{I_{и}}{I_e} = S_M P_{ИЗМ} . \quad (13)$$

Это соотношение и лежит в основе работы электронного ионизационного преобразователя. Множитель пропорциональности

$$S_M = \frac{I_{и}}{I_e} \frac{1}{P_{ИЗМ}}$$

выражает чувствительность преобразователя: очевидно, чувствительность тем выше, чем больше отношение  $I_{и} / I_e$  при данном давлении  $p_{ИЗМ}$

Для получения однозначной зависимости ионного тока от давления электронный ток манометрического преобразователя поддерживают постоянным. Тогда

$$I_{и} = k_T P_{ИЗМ} , \quad (14)$$

где  $k_T = S_M I_e$  характеризует величину ионного тока на единицу давления ( $k_T$  иногда называют токовой чувствительностью или постоянной электронного ионизационного преобразователя).

На основании (14) давление в манометрическом преобразователе определяется соотношением

$$P_{ИЗМ} = \frac{1}{\kappa_T} I_{И}. \quad (15)$$

Таким образом, для измерения давления достаточно при заданном электронном токе измерить ионный ток и разделить его на постоянную преобразователя.

На рис. 9 приведена упрощенная принципиальная схема включения электронного ионизационного преобразователя.

В электрическую схему измерительного блока входят:

а) цепь катода 1, состоящая из источника питания и реостата 6 для регулировки температуры и, следовательно, эмиссии электронов;

б) цепь сетки 2, состоящая из источника питания и прибора 5 для измерения электронного тока;

в) цепь коллектора 3, состоящая из источника питания и прибора 4 для измерения ионного тока.

Верхний предел измерения типового электронного преобразователя равен  $\sim 1$  Па и соответствует нарушению линейности градуировочной характеристики, когда средняя длина свободного пути электрона в объеме прибора становится меньше пути электрона между электродами. Для расширения верхнего предела можно уменьшить расстояние между электродами. Существуют приборы, верхний предел которых таким путем удалось довести до  $10^2$  Па. Чтобы катод не сгорел при таких высоких давлениях, его изготавливают из оксидов редкоземельных металлов.

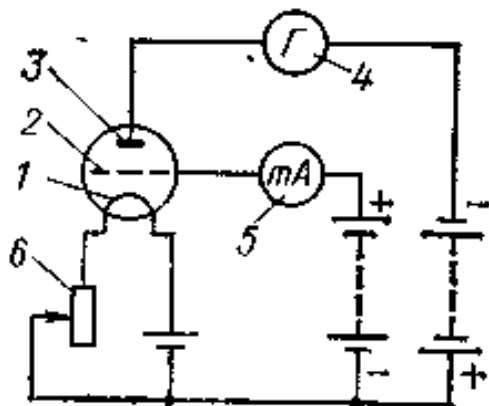


Рис 9. Упрощенная принципиальная схема включения электронного ионизационного манометрического преобразователя 1 — катод, 2 — анодная сетка, 3 — коллектор ионов, 4 — прибор для измерения ионного тока, 5 — миллиамперметр, 6 — реостат.

Нижний предел измерения определяется фоновыми токами в цепи коллектора, возникающими из-за эмиссии фотоэлектронов в результате мягкого рентгеновского излучения анодной сетки и ультрафиолетового излучения накаливаемого катода. Рентгеновское излучение анодной сетки является результатом ее бомбардировки электронами. Автоэлектронная эмиссия коллектора появляется под действием разности потенциалов 200—300 В между коллектором и анодной сеткой и вносит дополнительную составляющую в фоновый ток.

Фоновые электронные токи имеют одинаковое направление с ионным током и поэтому оказывают одинаковое воздействие на измерительные приборы. Максимальным фоновым током является ток рентгеновского излучения, пропорциональный эмиссионному току:  $I_{\phi} = K_s I_e$ , где  $K_s$  — коэффициент пропорциональности.

С учетом фоновых токов рентгеновского излучения уравнение электронного преобразователя можно записать в следующем виде:  $I = I_{\text{и}} + I_{\text{ф}} = I_{\text{е}}(K_{\text{S}} + K_{\text{и}} p)$ , а нижний предел измерения — определить соотношением ионного и фонового токов:  $I_{\text{и}}/I_{\text{ф}} = K_{\text{и}}/(K_{\text{S}} p)$ .

Таким образом, для расширения нижнего предела измерения нужно при постоянном давлении  $p$  увеличить  $K_{\text{и}}$  или уменьшить  $K_{\text{S}}$ .

Для уменьшения фоновых токов и, следовательно, постоянной  $K_{\text{S}}$  был предложен преобразователь с осевым коллектором, в котором катод и коллектор поменялись местами. Это значительно уменьшило телесный угол, в котором рентгеновское излучение сетки попадает на коллектор. Это привело к уменьшению  $K_{\text{S}}$  приблизительно в  $10^3$  раз по сравнению с конструкцией и расширило нижний предел измерения давления до  $10^{-8}$  Па.

Для измерения давления до  $10^{-8}$  Па промышленностью выпускается серия электронных ионизационных манометрических преобразователей с осевым коллектором ионов. Коллектор ионов преобразователя (рис. 14) установлен по оси анодной сетки 2 и выполнен в виде тонкого вольфрамового стержня, имеющего в основании диаметр 0,1 мм и постепенно утончающегося к вершине.

Преобразователь имеет сменный катод 1, расположенный с наружной стороны анодной сетки 2. При работе преобразователя электроны колеблются по обе стороны анодной сетки. На коллектор 3 попадают только те ионы, которые образовались внутри нее. Анодная сетка 2 преобразователя может быть обезгажена электронной бомбардировкой или пропусканием тока по ней. В последнем случае сетка может быть нагрета до 1100 К.

Электроды преобразователя размещаются на фланце 5 непосредственно в вакуумном сосуде, в котором измеряют давление. Для исключения влияния окружающих преобразователь металлических конструкций вакуумной



системы на метрические характеристики преобразователя и воздействия различного рода наводок электродная система окружена заземленным металлическим экраном 4. При давлениях выше  $10^{-2}$  Па экран отключается от общего минуса и используется в качестве анода. Коллектором ионов служит в этом случае анодная сетка преобразователя.

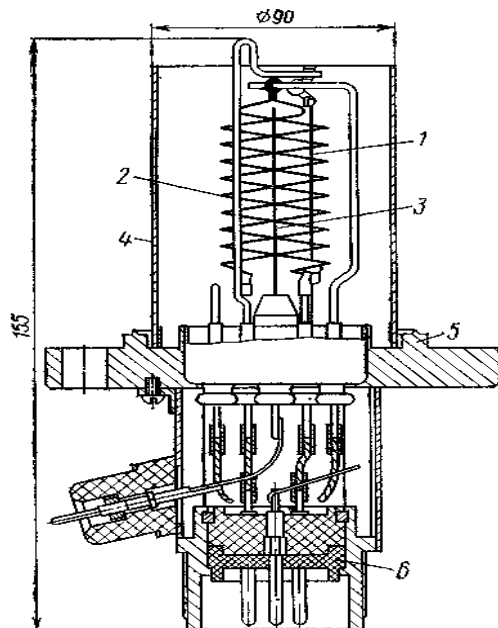


Рис. 10. Электронный ионизационный преобразователь для измерения сверхнизких давлений. 1 — катод; 2 — анодная сетка; 3 — коллектор; 4 — экран, 5 — фланец; 6 — цоколь.

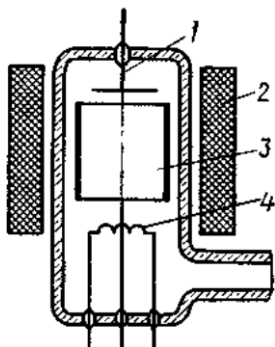


Рис. 11. Конструктивные схемы электронных преобразователей с магнитным полем.

Чувствительность  $K_{и}$  можно увеличить, если поместить преобразователь в магнитное поле (рис.11). Электроны от катода к аноду в этом случае движутся по спирали. В электронном преобразователе с магнитным полем, создаваемым катушкой 2 и направленным параллельно оси анода 3, катод 4—термоэлектронный, а коллектор 1 расположен в верхней части баллона. Такой преобразователь за счет увеличения чувствительности имеет нижний предел на 2... 3 порядка ниже, чем конструкция преобразователя, показанная на рис. 9.

Электронный преобразователь имеет неодинаковую чувствительность к различным газам, так как эффективность ионизации зависит от рода газа.

Если преобразователь градуирован по воздуху, а применяется для измерения давления других газов, то необходимо учитывать относительную чувствительность  $R$ . Из условия равенства ионных токов запишем  $K_1 p_1 = K_2 p_2 = \dots = K_i p_i = K_B p_B$ , откуда  $p_i = p_B / R_i$ , где  $R_i = K_i / K_B$  — относительная чувствительность к данному газу. Относительные чувствительности электронного преобразователя представлены в табл. 2.

Относительная чувствительность преобразователей Таблица 2.

Тип преобразователей	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	He	Ar	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Xe	Ne	CO	H <sub>2</sub> O	Ацетон
Электронный	1	0,43	0,16	1,3	1,6	0,85	1,5	2,8	0,27	1,04	-	-
Магнитный	1	0,43	0,15	1,4	1,3	0,86	-	3,2	0,26	-	-	-
Радиоизотопный	1	0,23	0,21	1,2	1,5	-	-	-	-	-	0,88	2,7

При измерении давления смеси газов из условия равенства ионных токов имеем  $K_{CM} p_{CM} = K_1 p_1 + K_2 p_2 + \dots + K_n p_n$ . Поделив полученное уравнение на  $K_B$ , получим

$$\frac{K_{CM} p_{CM}}{K_B} = R_1 p_1 + R_2 p_2 + \dots + R_n p_n$$

откуда

$$R_{CM} = \sum_{i=1}^n R_i V_i ;$$

$$V_i = \frac{p_i}{p_{CM}}$$

Быстрота откачки электронных преобразователей составляет  $10^{-3} \dots 10^{-1}$  л/с, что в закрытых конструкциях преобразователей, присоединяемых через трубку с малой проводимостью, может привести к заметным ошибкам измерения. Дополнительные источники погрешности измерения связаны с химическим взаимодействием газов с накалимым катодом и ионной десорбцией под воздействием электронной бомбардировки газов, химически поглощенных анодом. Технические характеристики современных вакуумметров с электронными преобразователями даны в табл.1 приложения.

**1.7. Практические указания по эксплуатации приборов для измерения полного давления.**

### **1.7.1. Присоединение манометрических преобразователей к вакуумной системе**

Тепловые преобразователи должны устанавливаться по возможности вдали от источников тепла с тем, чтобы температура корпуса преобразователя была в пределах 288—298 К.

Допускается работа электронных ионизационных преобразователей во внешних магнитных полях с напряженностью не более 0,015 А/м. Если напряженность магнитного поля превышает это значение, то электронные ионизационные манометрические преобразователи необходимо защищать экраном из ферромагнитного материала.

Применяемое уплотнение не должно давать потоков газовой выделения или диффузии газа через него, которые могут исказить отсчет давления в обследуемой системе. В диапазоне высокого вакуума предпочтительны, а сверхвысокого — обязательны применение металлического уплотнителя или напайка стеклянного преобразователя на систему. Во всех случаях требуется тщательная проверка герметичности соединения преобразователя с вакуумной системой.

### **1.7.2 Отсчет давлений**

Шкалы вакуумметров отградуированы в единицах давления, относительных или электрических единицах. В последних двух случаях к вакуумметрам прилагается градуировочная кривая или указывается их чувствительность по давлению. Метрические характеристики вакуумметров косвенного действия приведены для азота (сухого воздуха). При измерении давления других газов следует пользоваться градуировочными кривыми по этим газам или соответствующими пересчетными коэффициентами относительной чувствительности. Давление газа в полости манометрического преобразователя:

$$p = \frac{P_{ИЗМ}}{\alpha_c}, \quad (16)$$

где  $a_r$  — относительная чувствительность,  $p$  — давление газа в полости манометрического преобразователя,  $p_{изм}$  — отсчет давления вакуумметром.

### **1.7.3. Очистка и обезгаживание преобразователей**

На работу преобразователей и достоверность измерения давления резко влияет загрязненность прибора.

Загрязнение изоляторов преобразователя шунтирует входную цепь усилителя, занижая показания давления. Эти загрязнения происходят как со стороны вакуумной полости, так и с атмосферной стороны.

Цепь, замыкающую изолятор изнутри, часто удается разрушить искровым течеискателем. Иногда причиной неожиданных утечек по изоляторам сверхвысоковакуумных преобразователей является повышенная влажность в помещении.

В газовой атмосфере вакуумных установок всегда присутствуют в большем или меньшем количествах легко конденсирующиеся высокомолекулярные соединения. Особенно это характерно для установок, работающие в диапазоне низкого и среднего вакуума. Эти соединения загрязняют электроды манометрического преобразователя и со временем искажают его метрические характеристики. Загрязненные преобразователи промывают бензином или этиловым спиртом и сушат.

Часто для защиты преобразователей от паров масел и других конденсирующихся веществ используют низко температурные охлаждаемые ловушки. При этом вакуумметр измеряет давление только тех газов которые не конденсируются при температуре ловушки, и измеренное давление, отсчитываемое вакуумметром, будет ниже полного давления в вакуумной системе.

Для снижения газыделения преобразователя его необходимо обезгазить прогревом. Возможны следующие виды прогрева преобразователей:

- внешней печью до температуры не более 700 К;

- электронной бомбардировкой;
- пропуском электрического тока по анодной сетке и другим накаливаемым элементам.

Одновременный прогрев внешней печью и электронной бомбардировкой, как правило, недопустим. Под воздействием высоких напряжений нагретое стекло легко подвергается электролизу с образованием неустраняемых утечек и нарушением герметичности.

Не рекомендуется также прогревать преобразователи при давлении выше  $10^{-2}$  Па.

#### **1.7.4. Сорбционно-десорбционные эффекты**

В диапазоне высокого и сверхвысокого вакуума необходимо учитывать сорбционно-десорбционные явления в манометрическом преобразователе, в вакуумной системе и соединительных трубопроводах и стремиться к исключению их влияния на измерение давления. Преобразователь, если он не открытого типа, соединен с обследуемой системой через трубопровод. При этом между преобразователем и вакуумной системой может быть перепад давлений, вызванный ограниченной проводимостью трубопровода и тем, что преобразователь может выделять или откачивать газ.

Для уменьшения перепада давлений  $p_c$ -р-изм необходимо, чтобы соединительный трубопровод был максимально коротким и наибольшего возможного диаметра

#### **1.7.5. Инерционность отсчета давления**

Как показывает практика, давление газа в системе всегда изменяется во времени. Перепад давления на трубопроводе, соединяющем преобразователь с вакуумным сосудом, переходные процессы в самом преобразователе и инерционность измерительного блока будут давать при измерении изменяющихся давлений дополнительную погрешность.

Инерционность процессов характеризуется постоянной времени  $\tau_v$ . В течение периода, равного трем постоянным

времени  $3\tau_B$ , давления в объеме преобразователя и в вакуумной системе практически выравниваются, относительная разность давлений составляет около 5%.

Постоянная времени манометрического преобразователя

$$\tau_B = \frac{V}{U}$$

где  $V$  — объем преобразователя,  $U$  — проводимость трубопровода, соединяющего преобразователь с вакуумной системой. Снижению постоянной времени способствует применение преобразователей с малым собственным объемом и коротким соединительным трубопроводом. Так постоянная времени открытых преобразователей, размещенных непосредственно в откачиваемом сосуде, составляет менее  $10^{-3}$  с. Инерционность переходных электрических процессов в ионизационных манометрических преобразователях практически можно не учитывать, так как эти процессы определяются временем около  $10^{-6}$  с. Инерционность срабатывания блокировочных устройств вакуумметров определяется инерционностью преобразователя и его входных цепей.

Постоянная времени входных цепей усилителей постоянного тока сверхвысоковакуумных вакуумметров, определяющая инерционность измерительных блоков, равна произведению сопротивления входной цепи на ее емкость. Быстродействие электромагнитных реле, широко используемых в вакуумметрах, составляет около  $10^{-2}$  с.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с устройством и работой термопарной ПМТ-2 и ионизационной ПМИ-2 вакуумных преобразователей.
2. Изучить работы вакуумметра ВИТ-2, процесс юстировки термопарной ПМТ-2 лампы.
3. Взять новую запаянную лампу ПМТ-2 путем подбор тока накала нагревателя добиться установку показания

манометра термодпарной части вакуумметра ВИТ-2 на 10mV (выбор тока накала лампы).

4. Ознакомиться с инструкцией на аппаратуру входящую в состав вакуумной установки.
  5. Открыть воду на охлаждение рубашки диффузионного насоса.
  6. Включить механический насос.
  7. Через несколько минут открыть клапан между механическим насосом и диффузионным.
  8. Включить вакуумметр и по термодпарной вакуумной лампе провести контроль процесса откачки предварительного вакуума из диффузионного насоса до давления не хуже чем  $10^{-2}$  торр.
  9. Включить нагреватель диффузионного насоса.
  10. Закрыть клапан между механическим насосом и диффузионным.
  11. Открыть клапан механический насос – камера .
  12. Включить вакуумметр и по термодпарной вакуумной лампе провести контроль процесса откачки предварительного вакуума из камеры до давления не хуже чем  $5 \cdot 10^{-2}$  торр.
- Примечание: Во время откачки камеры следить за давлением в диффузионном насосе при уменьшении давления ниже  $10^{-1}$  торр переключить откачку на насос.*
13. Закрыть клапан механический насос – камера.
  14. Открыть клапан между механическим насосом и диффузионным .
  15. Вывести диффузионный насос на рабочий режим ( 30 мин. разогрева печки).
  16. Повторить п. 10-14.
  17. Открыть клапан между диффузионным насосом и камерой .
  18. Провести процесс откачки в течении 10 мин.
  19. Включить инициационную часть вакуумметра ВИТ-2.
  20. Установить нулевое начальное показание манометра инициационной части вакуумметра.



21. Установить ионизационный ток лампы на уровне 50 делений шкалы вакуумметра.
22. Включить прогрев ионизационной лампы ПМИ-2 в течении 5 мин.
23. Провести контроль процесса откачки из камеры до давления не хуже чем  $5 \cdot 10^{-5}$  торр.
24. Путем подбор тока накала нагревателя добиться установку показания манометра термодпарной части вакуумметра ВИТ-2 на 10mV (выбор тока накала лампы).
25. Закрыть клапан между диффузионным насосом и камерой.
26. Выключить нагреватель диффузионного насоса.
27. Остудить диффузионный насос в течении 30 мин.
28. Закрыть клапан между механическим насосом и диффузионным.
29. Выключить механический насос.
30. Напустить в магистраль механического насоса воздух.
31. Закрыть воду на охлаждение рубашки диффузионного насоса.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем различие между абсолютными вакуумметрами и вакуумметрами для косвенных измерений?
2. Порядок юстировки термодпарной лампы ПМИ-2.
3. Почему тепловые манометры не используются для измерения высокого вакуума?
4. Каковы причины различия чувствительностей схем электронного преобразователя с внешним и внутренним коллектором?
5. Что является причиной возникновения фоновых токов в электронном преобразователе?
6. Какие существуют пути повышения чувствительности электронных преобразователей?
7. Порядок включения ионной части вакуумметра ВИТ-2 и измерения давления вакуумным преобразователем ПМИ-2?

8. Чем вызвана зависимость чувствительности от рода газа у электронных преобразователей?
9. Принцип работы термопарного вакуумного преобразователя?
10. Принцип работы ионного вакуумного преобразователя?

## Приложение

### Характеристики вакууметров

Таблица.1.

Наименование вакуумметра	Типы вакуумметров	Диапазон рабочих давлений, Па	Погрешность измерения, %	Габариты (длина x ширина x высота), мм	Тип преобразователей
Деформационный Тепловой	ВДГ-1	$10^2 \dots 10^4$	$\pm 15$	—	ПМГД-1
	ВТСО-1	$10^{-1} \dots 10^4$	$\pm 10$	80X150X X295	—
	ВСБ-1	$1 \dots 4 \cdot 10^3$	$\pm 30$	390 X 248 X X257	МТ-6, МТ-6-3
Магнитный	ВТ-2А-П	$10^{-1} \dots 3 \cdot 10^2$	$\pm 30$	226X248X X257	ПМТ-2, ПМТ-4М, МТ-8
	ВТ-3	$10^{-1} \dots 7 \cdot 10^2$	$\pm 30$	320X185X X150	ПМТ-2, ПМТ-4М, МТ-8
	ВТБ-1	$10^0 \dots 4 \cdot 10^3$	-40	200X158X X319	МТ-6
	РВТ-2М	$10^0 \dots 4 \cdot 10^3$	-40 ... +60	100X158X X206	МТ-6
	ВМБ-3	$10^{-5} \dots 3 \cdot 10^0$	$\pm 170$	380 X 290 X X240	ЦММ-13
	ВМБ-6	$10^{-5} \dots 10^{-1}$	-50 .+80	400 X 200 X X390	ПММ-32
	ВМБ-8	$10^{-8} \dots 10^{-1}$	-55 .+130	240X158X X335	ПММ-32

Наименование вакуумметра	Типы вакуумметров	Диапазон рабочих давлений, Па	Погрешность измерения, %	Габариты (длина x ширина x высота), мм	Тип преобразователей
Ионизационно-термопарный	ВМБ-11	$10^{-8} \dots 10^{-1}$	—50... +100	—	ПММ-46
	ВИМ-2	$10^{-11} \dots 10^{-2}$	±70	386 X 278 X X292	ПММ-14
	ВИТ-2	$10^{-5} \dots 10^1$	±30	320 X 280 X X215	ПМИ-51, ПММ-3-2, ПМИ-2
	ВИТ-3	$10^{-5} \dots 10^2$	±35	230 X 360 X X485	ПМТ-2, ПМТ-4М, МТ-8
Ионизационный	ВИ-12	$10^{-8} \dots 10^{-2}$	±50	448 X 340 X X287	ПМИ-12, ПМИ-12-8
	ВИ-14	$10^{-8} \dots 10^1$	±50	480X220X X360	ПМИ-27, ПМИ-12, ПМИ-12-8
	ВИЦБ-11	$2 \cdot 10^{-3} \dots 10^2$	—	100X158X X230	ИМ- 12, ПМИ-10-2
	ВИО-1	$7 \cdot 10^{-9} \dots 10^{-1}$	±20	228X95X X328	ПМИ-39-2

## Лабораторная работа №4

### Методы течеискания

**Цель работы:** Ознакомиться с методами определения микротечей в вакуумных системах.

**Приборы и оборудование:** пост вакуумный УВН-2М, вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-2, лампа вакуумная термопарная ПМТ-2, лампа вакуумная ионизационная ПМИ-2.

#### 1. Общие сведения

Все узлы и приборы, используемые в вакуумной системе, перед сборкой необходимо проверить на герметичность, что предотвращает непроизводительные затраты времени и средств для отыскания мест натекания (течей) в уже собранной системе. Если все же суммарное натекание в собранной вакуумной системе превышает допустимое, то необходимо отыскать течи и устранить их.

Основные методы течеискания

Табл. 1

Наименование метода	Описание метода	Минимальная определяемая течь, м <sup>3</sup> Па/с	Применение
Опресовка	Метод обнаружения течи, при котором с одной стороны испытуемого элемента создается давление пробного вещества, превышающее атмосферное	10 <sup>-6</sup>	Предварительные испытания на герметичность металлических приборов и узлов

Люми- несцент- ный	Метод обнаружения течи, основанный на способности люминесцирующих веществ, проникающих через течь, светиться под действием ультрафиолетового облучения	$10^{-8}$ - $10^{-9}$	Применяется для испытания герметичности малогабаритных открытых объектов, откачка или опрессовка которых затруднена
Искровой	Применяется течеискатель, действие которого основано на проникновении маломощного искрового разряда внутрь откачиваемого стеклянного сосуда через течь	$10^{-4}$	Применяется для поиска течей в стеклянных вакуумных системах
Маномет- рический	Применяется течеискатель, действие которого основано на изменении выходного сигнала манометрического преобразователя при проникновении пробного вещества через течь	$10^{-5}$ - $10^{-7}$	Применяется для поиска негерметичных мест в вакуумных системах без количественной оценки течей
Галоген- ный	Применяется течеискатель, действие которого основано на изменении эмиссии ионов нагретой металлической поверхности при попадании на нее пробного вещества, содержащего галогены	$10^{-8}$ - $10^{-9}$	Применяется для поиска негерметичных мест в больших объемах или в системах с разветвленными трубопроводами
Масс- спектро- мет- рический	Применяется течеискатель, действие которого основано на принципе разделения ионов разных газов по массам	$10^{-14}$ - $10^{-17}$	Широко применяется для поиска весьма малых течей в вакуумных системах и электровакуумных приборах

Следует отметить, что, помимо истинных течей, которые являются местом входа в систему атмосферного

воздуха, могут существовать и так называемые кажущиеся течи. Такие течи возникают чаще всего в неправильно сконструированных сварных или паяных соединениях, в которых имеются воздушные карманы.

Приборы, служащие для обнаружения мест течи, получили название течеискателей.

Течеискатели избирательно реагируют на отдельные физико-химические свойства газов, с помощью которых определяется место течи. Эти газы мы назовем пробными веществами. Пробное вещество, проходя через течь, попадает в датчик течеискателя и создает сигнал, по величине которого судят о размерах течи. Основным параметром течеискателя является его чувствительность, которая характеризуется либо минимальным потоком пробного вещества, определяемого прибором, либо концентрацией пробного вещества в атмосфере, которую способен уловить течеискатель.

В табл. 1 приведены основные методы течеискания, получившие распространение в лабораторной практике и в промышленности.

### **1.1. Метод опрессовки**

Метод опрессовки заключается в создании внутри испытуемого сосуда давления, превышающего атмосферное, и применении того или иного внешнего указателя места течи.

Этот метод, как правило, к полностью собранной вакуумной системе неприменим, так как в большинстве случаев не все узлы последней могут выдержать повышенное давление. В то же время метод очень удобен для предварительных испытаний на герметичность металлических приборов и узлов.

Давление внутри испытуемого сосуда можно создавать при помощи газообразных веществ. Для обнаружения места течи могут служить различные явления, связанные с выходом сжатого газа из мест натекания. Так, если внутри сосуда создано повышенное давление воздуха или азота, то в качестве

указателя может служить задувание или колыхание пламени какой-либо горелки, поднесенной к негерметичному месту, или даже звук (шипение) выходящего газа. Однако таким путем можно обнаружить лишь весьма грубые течи, величина которых больше  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ .

Значительно более тонкие течи можно отыскать, применяя в качестве указателя мыльную пленку. Мыльная пленка, попав на место течи, легко образует пузыри, регулярное появление которых указывает на место нарушения герметичности.

Несколько менее чувствительным является наблюдение за образованием пузырей в воде, в которую погружен испытуемый сосуд. На месте грубой течи появляется целая цепочка всплывающих вверх пузырей; при более тонкой течи отдельные пузыри могут появляться лишь периодически.

## **1.2. Метод теплового манометрического преобразователя.**

Тепловой манометрический преобразователь обычной конструкции можно применить для поиска течи. Для этого между манометрическим преобразователем и вакуумной системой должна быть достаточная проводимость, чтобы при воздействии на негерметичное место пробным веществом последнее легко проникало в достаточном количестве и быстро заменяло воздух в объеме преобразователя.

В качестве пробного вещества выбирают такие пары или газы, которые по сравнению с воздухом обладают или значительно большей, или значительно меньшей теплопроводностью. Пока течь не обнаружена, показания прибора в измерительном блоке преобразователя не изменяются.

Если в качестве пробного вещества использовать, например, водород, обладающий, как известно, большой теплопроводностью, то при его попадании в манометрический преобразователь через места течи в вакуумной системе

температура нити понизится и стрелка измерительного прибора отклонится влево (указывая как бы на повышение давления).

Очевидно, методом теплового манометрического преобразователя можно пользоваться, если в системе поддерживается давление, не выходящее за пределы рабочего диапазона этого преобразователя.

Следует заметить, что на показания измерительного прибора влияет не только проникновение пробного вещества, но и изменение давления воздуха в манометрическом преобразователе. Поэтому при поисках мест течи давление необходимо поддерживать на достигнутом уровне путем непрерывной откачки вакуумной системы.

С помощью теплового манометрического преобразователя можно обнаружить наименьшую течь, равную  $10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ .

### **1.3. Метод высоковакуумного манометрического преобразователя**

Если вакуумная система может быть откачана до давления порядка  $5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$  или ниже и обнаруживает признаки не герметичности, то течь можно найти с помощью какого-либо высоковакуумного манометрического преобразователя, например, использовав для этого электронный ионизационный вакуумметр.

В качестве пробного вещества применяют такие пары или газы, которые, попадая в манометрический преобразователь через течь в вакуумной системе, изменяют ионный ток. Ионный ток будет возрастать, если применить пары ацетона, эфира и т. п., так как последние, попадая в манометрический преобразователь, разлагаются при соприкосновении с накалившимся катодом, отчего увеличивается количество молекул и, следовательно, ионов. Если же в качестве пробного вещества взять гелий или неон, то ввиду более низкой чувствительности электронного ионизационного



преобразователя по этим газам по сравнению с воздухом количество ионов, образующихся в манометрическом преобразователе, уменьшится и измерительный прибор покажет меньший ионный ток. Метод высоковакуумного манометрического преобразователя позволяет обнаруживать наименьшую течь, равную  $10^{-7}$  м<sup>3</sup>Па/с.

#### 1.4. Масс-спектрометрический течеискатель

В основу принципа работы течеискателя этого типа положен масс-спектрометрический метод обнаружения вещества в испытываемом сосуде.

В качестве пробного вещества могут быть применены водород, аргон или гелий. Однако чаще всего в масс-спектрометрических течеискателях используют гелий. Благодаря малому содержанию гелия в атмосферном воздухе (всего 1/200000 часть) и в газах, выделяемых внутренними стенками вакуумной системы, фон, на котором регистрируют сигнал, невелик, что обеспечивает высокую чувствительность течеискателя.

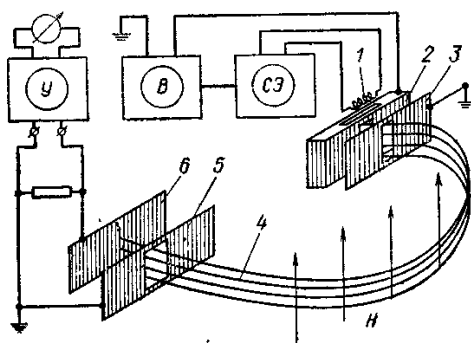


Рис.1. Схема масс-спектрометрического течеискателя. 1—катод; 2 — коробка ионизатора; 3 — входная диафрагма, 4—ионный луч; 5 — выходная диафрагма; 6 — коллектор ионов; Н — направление магнитного поля; СЭ — стабилизатор эмиссии катода; В — выпрямитель (разгоняющее напряжение); У — усилитель ионного тока с измерительным прибором

Малая молекулярная масса гелия (массовое число 4) позволяет не только создать малогабаритную и простую конструкцию масс-спектрометрической камеры течеискателя, но и обеспечивает эффективное проникновение пробного вещества через течи.

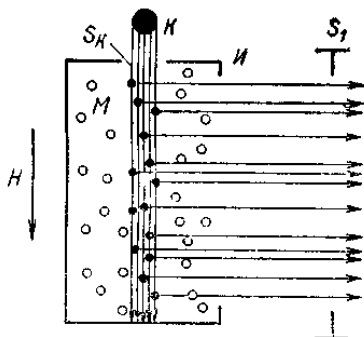


Рис. 2. Принцип действия ионного источника. К — катод, И — коробка ионизатора;  $S_1$  — входная диафрагма;  $H$  — направление магнитного поля;  $S_K$  — входная щель для электронов, эмиттируемых катодом.

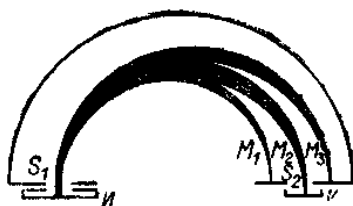


Рис. 3. Схема отклонения ионов различных масс в поперечном магнитном поле. И — коробка ионизатора,  $S_1$  — входная диафрагма;  $S_2$  — выходная щель; К — коллектор ионов;  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  — ионные пучки с различными массовыми числами.

К этому следует добавить, что гелий, будучи химически инертным газом, совершенно безвреден и безопасен в работе.

Течеискатель состоит из трех основных частей: анализатора (масс-спектрометрической камеры с магнитом), вакуумной системы и электрических блоков питания и

измерения. В анализаторе смонтированы ионный источник, приемник ионов и входная и выходная диафрагмы (рис. 1). Ионный источник (рис. 2) состоит из накаливаемого катода К, коробки ионизатора И и входной диафрагмы S<sub>1</sub>. Приемник ионов состоит из коллектора К и выходной щели S<sub>2</sub> (рис. 3).

В источнике ионов накаливаемый вольфрамовый катод эмитирует электроны, которые фокусируются магнитным полем с индукцией В и ускоряются электрическим полем, приложенным между катодом и коробкой ионизатора.

Течеискатель своей вакуумной частью присоединяется к испытываемому сосуду, который снаружи обдувается гелием. Молекулы гелия, проникая через негерметичные места испытываемого сосуда, поступают в анализатор и, следовательно, в коробку ионизатора ионного источника. В коробке ионизатора молекулы газа, в том числе и гелия, подвергаются ионизации потоком электронов (рис. 2). Образующиеся ионы вытягиваются из ионизатора, фокусируются в пучок и ускоряются в область анализатора с помощью системы электрических линз. Для анализа газов по массам применен анализатор с 180 градусной фокусировкой ионного луча полем постоянного магнита (рис. 3).

Попавшие в анализатор ионы с некоторой постоянной энергией двигаются под действием лоренцевой силы в однородном поперечном магнитном поле анализатора, свободном от электрических полей. В этом случае радиусы г окружностей, по которым перемещаются ионы, могут быть определены из уравнения

$$r = \frac{1.47 \cdot 10^{-4}}{B} \sqrt{MU}, \quad (1)$$

где В — индукция магнитного поля, U — ускоряющее напряжение, приложенное между коробкой ионизатора и диафрагмой S<sub>1</sub>, М — массовое число.

Из анализа формулы (1) видно, что при постоянных значениях В и U радиус траектории зависит от массового числа М.

Таким образом, в магнитном поле происходит разделение ионного луча на ряд отдельных лучей с одинаковым значением массового числа.

Подобрав ускоряющее напряжение  $U$ , можно достичь того, что на коллектор ионов, расположенный в анализаторе, под углом  $180^\circ$ , к ионному источнику, будут попадать только ионы гелия. Чтобы одновременно с ионами гелия на коллектор не попадали ионы других масс, случайно попавшие на рабочую траекторию, перед коллектором помещают супрессор — подавитель фона. На супрессор подается потенциал, тормозящий пролетающие ионы. Только ионы, обладающие достаточной энергией, будут в состоянии преодолеть это тормозящее поле и попадут на коллектор. Коллектор ионов б соединен с усилителем тока  $U$  (см. рис. 1). Усиленный сигнал регистрируется стрелочным прибором. Принципиальная вакуумная схема течеискателя показана на рис. 4.

Масс-спектрометрическая камера 1 предварительно откачивается через кран 11 механическим вакуумным насосом 9. Высоковакуумная откачка камеры до давления  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  Па производится через кран 2, азотную ловушку 3, кран 6 пароструйным диффузионным насосом 7, выпускной патрубков которого через кран 8 соединен с насосом 9.

Для проверки чувствительности течеискателя предусмотрена калиброванная гелиевая течь 14, которая подсоединяется к вакуумной системе через кран 13. Кран 10 служит для напуска газа в систему при выключении насоса 9 или вскрытии камеры 1.

Чувствительность испытаний может быть еще больше увеличена, если применить метод дросселирования откачки. Для этой цели предусмотрен кран 6, который позволяет изменять проходное сечение на входе насоса 7 и тем самым регулировать быстроту откачки гелия из масс-спектрометрической камеры 1 а следовательно, и чувствительность течеискателя к гелию. Этот метод дает возможность провести предварительные испытания

обследуемого сосуда при малой инерционности прибора, а затем путем частичного закрытия крана б осуществить быстрый переход к режиму высокочувствительных испытаний.

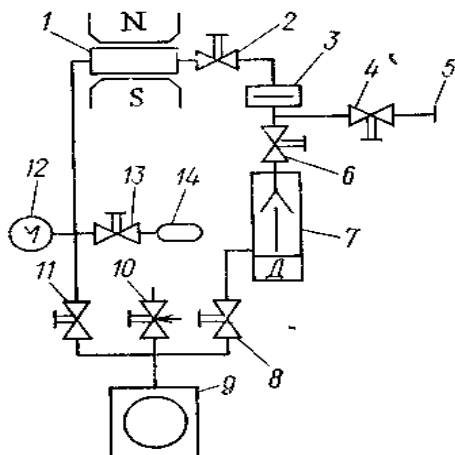


Рис. 4. Принципиальная схема вакуумной системы масс-спектрометрического течеискателя. 1 — масс-спектрометрическая камера с магнитами (анализатор); 2, 6, 8, 10, 11, 13 — краны; 3 — азотная ловушка; 4 — дросселирующий кран; 5 — присоединительный фланец; 7 — высоковакуумный насос, 9 — насос предварительного разрежения; 12 — манометрический преобразователь; 14 — калиброванная течь

Предельно высокая чувствительность к натеканиям порядка  $10^{-14}$  м<sup>3</sup>Па/с может быть получена при работе по методу накопления пробного вещества в испытываемом сосуде, изолированном от откачки. Для этого испытываемый сосуд или его часть накрывают герметичным мешком, в который напускают гелий. Затем подсоединенный к течеискателю сосуд откачивается и изолируется краном 4 (рис. 4) от вакуумной системы течеискателя.

После окончания времени накопления  $t_{\text{нак}}$  вновь соединяют сосуд с вакуумной системой течеискателя. При

этом в момент соединения в результате накопления в сосуде устанавливается парциальное давление гелия

$$p = \frac{Q'_{НАТ} t_{НАТ}}{V}, \quad (2)$$

где  $Q'_{НАТ}$  — суммарный поток гелия через все течи испытываемого сосуда,  $V$  — объем испытываемого сосуда,  $t_{НАТ}$  — время накопления гелия.

Тогда через течеискатель при его соединении с испытываемым сосудом потечет поток гелия  $Q'_Г$ :

$$Q'_Г = p S_0 = \frac{Q'_{НАТ} t_{НАТ}}{V} S_0, \quad (3)$$

где  $S_0$  — эффективная быстрота откачки испытываемого сосуда вакуумной системой течеискателя.

Чувствительность течеискателя к минимальному потоку  $Q'_{МИН}$  определяет длительность и режим методики накопления. Поэтому время накопления

$$t_{НАК} = \frac{Q'_{МИН} V}{Q'_{НАТ} S_0}. \quad (4)$$

Часто при испытаниях сосудов с большим газовыделением применение описанной методики накопления ограничивается из-за общего увеличения давления в процессе накопления. Для исключения этого явления во время накопления масс-спектрометрическая камера, соединенная с испытываемым сосудом, непрерывно откачивается адсорбционным насосом, который, обладая избирательной откачкой газов, позволяет поддерживать достаточно низкое давление в сосуде и масс-спектрометрической камере при незначительной откачке гелия.

### 1.5. Истинные и кажущиеся течи

В идеальной вакуумной камере давление, достигаемое в момент отделения камеры от насосов, должно сохраняться бесконечно долго. В любой реальной камере после ее

отсоединения от системы откачки наблюдается повышение давления. Это вызывается проникновением газа извне в вакуумную камеру и десорбцией газа с поверхности деталей камеры или с ее стенок. Скорость повышения давления в единицу времени составляет

$$\frac{dP}{dt} = \frac{Q}{V} \quad (5),$$

где  $Q$  — скорость натекания (общее количество газа, проникающего в вакуумную камеру через течь, выраженное в л мкм рт. ст./сек или аналогичных единицах,  $V$  — объем камеры.

Величина  $Q$  состоит из двух частей:

$$Q = Q_L + Q_D \quad (6)$$

где  $Q_L$ —истинная скорость натекания, а  $Q_D$ — кажущаяся скорость натекания. Величина  $Q$  также включает в себя газ, который проникает через стенки вакуумной камеры вследствие их проницаемости; количество этого газа пренебрежимо мало во всех случаях за исключением режима сверхвысокого вакуума или в случае, когда стенки вакуумной камеры пористы.

По форме кривой роста давления можно определить, является ли течь истинной, кажущейся или сочетанием этих двух течей (рис.5).

Предельное разрежение, которое может быть достигнуто в данном вакуумном сосуде, выражается как

$$p_n = \frac{Q}{S_p}, \quad (7)$$

где  $S_p$ — скорость откачки на входе сосуда. Если через  $S_0$  обозначить скорость откачки у всасывающего патрубка насоса, а через  $C$  — проводимость соединительного трубопровода между насосом и сосудом, то  $S_p$  можно определить из равенства

$$\frac{1}{S_p} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_o}. \quad (8)$$

### **1.6. Истинные течи и вакуумная плотность**

Истинная скорость натекания определяется как количество газа в единицах произведения единицы давления на единицу объема, проходящего в единицу времени из окружающего пространства внутрь вакуумной камеры. Очевидно, об идеальной вакуумной плотности камеры можно говорить лишь в том случае, когда истинная скорость натекания внутрь камеры равна нулю, однако достичь этого так же невозможно, как достичь давления, равного нулю.

Скорость натекания выражается в л мм. рт. ст./сек. Скорость натекания в вакуумной системе или камере иногда выражается косвенно по увеличению давления за определенный промежуток времени (при известном объеме камеры) или как время, необходимое для натекания в вакуумную систему известного объема определенного количества газа. В табл. приведены сведения об изменении давления внутри вакуумной системы.

Скорость натекания и связанные с ней величины при натекании газа через течи различной величины. Например, скорость натекания порядка  $10^{-7}$  л-мм рт. ст./сек приводит к увеличению давления внутри сосуда объемом 5 л со скоростью  $8,6 \cdot 10^{-3} / 5 = 1,7 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст./день. Это значит, что время, необходимое для увеличения давления на  $10^{-3}$  мм рт. ст., составит  $277 \cdot 5 = 14$  ч.,  $1 \text{ см}^3$  газа (при нормальных условиях) натекает в такой сосуд за 87 дней. Размеры отверстия, через которое скорость натекания со стороны атмосферного воздуха в вакуумную камеру составляет  $10^{-7}$  л • мм рт. ст./сек, должны быть следующими: длина 10 мм, диаметр около 1,8 мкм.

### **1.7. Кажущиеся течи и газовыделение**

Кажущиеся течи определяются как фиктивный источник повышения давления в вакуумной системе, вызываемого в действительности медленным выделением



сорбированных газов. В настоящее время считается, что нижний предел газовыделения с  $1 \text{ см}^2$  лучшего материала после длительной откачки составляет не менее  $10^{-3} \text{ л} \cdot \text{мм. рт. ст./сек.}$  При расчете вакуумных систем обычно принимают следующие величины скорости газовыделения с поверхности различных материалов в л- мм рт. ст./сек  $\cdot \text{см}^2$ : для керамики —  $10^{-6}$ , для эластомеров —  $10^{-5}$ .

Скорость газовыделения различных материалов может быть понижена в результате их предварительного обезгаживания в вакууме путем отжига, ионной бомбардировкой или другими методами.

Физически сорбированные газы могут быть удалены при слабом нагреве материалов в вакууме; однако для удаления хемосорбированных и растворенных газов необходим прогрев в вакууме примерно до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Если в откачанную камеру напустить атмосферный воздух, то время достижения той же величины давления при повторной откачке снизится при условии, что время выдержки вакуумной системы на воздухе было непродолжительным. Обезгаженная вакуумная система всегда должна находиться под вакуумом.

### **1.8. Обнаружение течей**

Метод повышения давления. Если есть основания предполагать наличие течей, то необходимо прежде всего определить, действительно ли существует натекание. Кривые зависимости изменения давления со временем (рис. 5) дают возможность установить действительную скорость натекания.

Сначала вакуумная система откачивается до достижения установившегося значения давления. Для снижения влияния паров, присутствующих в вакуумной системе, рекомендуется использовать ловушку, охлаждаемую жидким азотом. После того как в процессе откачки понижение давления прекратится, насосы перекрываются от остальной части вакуумной системы.

Скорость натекания, л.мм.рт.ст./сек	Скорость увеличения давления в сосуде объемом 1 л.	Время увеличение давления на $10^{-3}$ мм.рт.ст. в сосуде объемом 1 л.	Время натекания $1\text{см}^3$ газа (при нормальных условиях)	Эквивалентное отверстие
$10^{-3}$	$10^{-3}$ мм.рт.ст./сек	1 сек	12,7 мин	Прямоугольная щель шириной 10 мм, высотой 0,1мм, глубиной 10 мм.
$10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст./мин.	10 сек	2,1 ч	Прямоугольная щель шириной 10 мм, высотой 30 мкм, глубиной 10 мм.
$10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст./ч	1,66 мин	21 ч	Капилляр диаметром 7 мкм, длиной 10 мм
$10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст./ч	16,6 мин	8,7 дней	Капилляр диаметром 4 мкм, длиной 10 мм
$10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст./день	2,77 ч	87 дней	Капилляр диаметром 1,8 мкм, длиной 10 мм
$10^{-8}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст./день	27,7 ч	2,4 года	Капилляр диаметром 0,8 мкм, длиной 10 мм
$10^{-9}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст./год	24 ч	24 года	Капилляр диаметром 0,4 мкм, длиной 10 мм
$10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст./год	240 лет	240 лет	Капилляр диаметром 0,2 мкм, длиной 10 мм

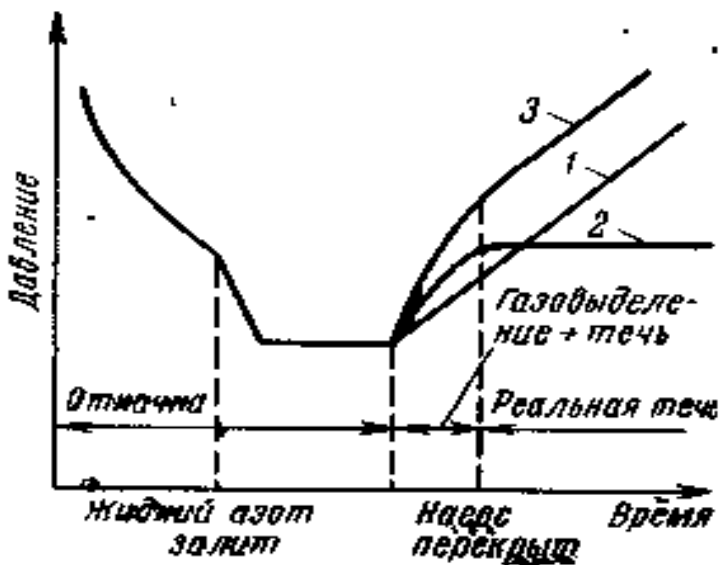


Рис. 5. Кривые зависимости изменения давления от времени в процессе откачки вакуумной системы и после перекрытия насосов. Кривая 1 показывает изменение давления при наличии истинных течей, кривая 2 — при наличии кажущихся течей; кривая 3 — при одновременном присутствии в системе как истинных, так и кажущихся течей

Кривые увеличения давления со временем при длительном изолировании вакуумной системы от насосов дают представление о том, вызвано ли увеличение давления лишь истинными течами (прямолинейная зависимость 1, рис. 5), одними лишь кажущимися натеканиями (участок насыщения — кривая 2) или сочетанием истинных и кажущихся течей (кривая 3). Измерения необходимо продолжать (особенно в случаях 2 и 3) до тех пор, пока форма кривой не определится. Первый участок кривой 3 указывает на существование течей двух типов, а угол наклона последующего прямолинейного участка дает величину скорости натекания (см. табл. ) на

единицу объема  $\Delta p/\Delta t$ . Таким образом, скорость натекания  $Q_L$  в испытываемый объем выражается как

$$Q_L = V \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (9)$$

Метод повышения давления позволяет непосредственно определить скорость натекания, но он требует длительного времени измерения. Этот метод позволяет определить, что система не только герметична, но и свободна от летучих загрязнений, если повышение давления лежит в допустимых пределах.

После испытания всей вакуумной системы необходимо снять кривые роста давления в ее отдельных изолированных частях — это позволяет обнаружить места натекания. При этом нет необходимости перемещать вакуумметр, используемый при измерениях, а достаточно лишь снять кривую сначала для той части вакуумной системы, которая присоединена к манометру, а затем последовательно открывать по одному все затворы. Таким образом, последовательно снимаются кривые при возрастающих объемах вакуумной системы. Произведения тангенсов угла наклона отдельных кривых на соответствующие им объемы показывают, в какой части (или частях) вакуумной системы имеются течи.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с инструкцией на аппаратуру входящую в состав вакуумной установки.
2. Открыть воду на охлаждение рубашки диффузионного насоса.
3. Включить механический насос.
4. Через несколько минут открыть клапан между механическим насосом и диффузионным.
5. Включить вакуумметр и по терморпальной вакуумной лампе провести контроль процесса откачки предварительного вакуума из диффузионного насоса до давления не хуже чем  $10^{-2}$  торр.

6. Открыть клапан механический насос – камера .
7. По термопарной вакуумной лампе провести контроль процесса откачки предварительного вакуума из камеры до давления не хуже чем  $10^{-2}$  торр.
8. Открыть натекаТЕЛЬ в вакуумную камеру, довести давление в подколпачной области до величины  $5 \cdot 10^{-2}$  торр.
9. Набрать в шприц  $1 \text{ см}^3$  ацетона технического, вылить содержимое в трубку натекателя.
10. Провести измерение давления в вакуумном посту с помощью термопарной лампы вакуумметра ВИТ-2.
11. Дождаться первоначальных показаний вакуумметра.
12. Повторить п 9-11, используя в качестве рабочей жидкости технический эфир.
13. Закрыть натекаТЕЛЬ.
14. Открыть клапан между механическим насосом и диффузионным.
15. Включить нагреватель диффузионного насоса.
16. Вывести диффузионный насос на рабочий режим ( 30 мин. разогрева печи).
17. Закрыть клапан между механическим насосом и диффузионным.
18. Открыть клапан механический насос – камера .
19. Включить вакуумметр и по термопарной вакуумной лампе провести контроль процесса откачки предварительного вакуума из камеры до давления не хуже чем  $5 \cdot 10^{-2}$  торр.  
*Примечание: Во время откачки камеры следить за давлением в диффузионном насосе при уменьшении давления ниже  $10^{-1}$  торр переключить откачку на насос.*
20. Закрыть клапан механический насос – камера.
21. Открыть клапан между механическим насосом и диффузионным .
22. Открыть клапан между диффузионным насосом и камерой .
23. Провести процесс откачки в течении 10 мин.
24. Включить инициационную часть вакуумметра ВИТ-2.

25. Провести контроль процесса откачки из камеры до давления не хуже чем  $5 \cdot 10^{-5}$  торр.
26. Открыть натекатель в вакуумную камеру, довести давление в подколпачной области до величины  $1 \cdot 10^{-4}$  торр.
27. Набрать в шприц  $1 \text{ см}^3$  ацетона технического, вылить содержимое в трубку натекателя.
28. Провести измерение давления в вакуумном посту с помощью ионизационной лампы вакуумметра ВИТ-2.
29. Дождаться первоначальных показаний вакуумметра.
30. Повторить п 27-29, используя в качестве рабочей жидкости технический эфир.
31. Закрыть натекатель.
32. Выключить ионизационную лампу вакуумметра ВИТ-2.
33. Закрыть клапан между диффузионным насосом и камерой.
34. Снять временную зависимость давления в вакуумной камере с помощью термодатчика лампы вакуумметра ВИТ-2.
35. Выключить нагреватель диффузионного насоса.
36. Остудить диффузионный насос в течении 30 мин.
37. Закрыть клапан между механическим насосом и диффузионным.
38. Выключить механический насос.
39. Напустить в магистраль механического насоса воздух.
40. Закрыть воду на охлаждение рубашки диффузионного насоса.

### **Контрольные вопросы**

1. Методы течеисскания?
2. Метод опрессовки?
3. Метод теплового манометрического преобразователя?
4. Метод высоковакуумного манометрического преобразователя?
5. Масс-спектрометрический течеискатель?
6. Причины мнимых и действительных течей в вакуумных системах?

7. Обнаружение течей методом повышения давления?

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.И. Пипко, В..Я. Плисковский и др. Основы вакуумной техники М: Энергоиздат 1981. 321 с.
2. Л.Н.Розанов Вакуумная техника М: Высшая школа 1990. 259 с.
3. Дж. Уэтсон Техника сверхвысокого вакуума Мир 1988. 315 с.
4. А.Рот Вакуумные уплотнения Энергия 1971. 165 с.
5. Б.И. Королев, В.И.Кузнецов и др. Основы вакуумной техники М: Энергия 1975. 309 с.