

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. М. И. КАЛИНИНА

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

Методические указания к лабораторным
работам

ЛЕНИНГРАД 1989

Методические указания по лабораторным работам по курсу "Вакуумная техника" предназначены для выработки у студентов практических навыков при изучении вакуумной аппаратуры и установок.

Выполнение работ осуществляется таким образом, что сначала студенты изучают отдельные элементы вакуумных систем: трубопроводы, фланцы, клапаны и затворы, смотровые окна и пр. Затем студенты знакомятся со средствами получения и измерения вакуума, контроля состава остаточной среды и обнаружения микротечей. В последних работах студентам предоставляется возможность самостоятельно провести исследовательскую работу на вакуумных установках по определению быстроты откачки насоса, проводимости трубопровода, а также собрать простую вакуумную систему и сделать ее работоспособной, используя знания, полученные в предыдущих работах.

В методическом указании к каждой лабораторной работе даются краткие сведения по теории изучаемого в работе материала.

Методические указания предназначены для студентов специальности 2006 "Электронное машиностроение".

Рекомендовано кафедрой "Автоматы" и методической комиссией вечернего факультета технологии и автоматизации производства ЛПИ им. М.И.Калинина.

Составители: Леонид Николаевич Розанов

Василий Евгеньевич Сказываев

РАБОТА № 1

КОНСТРУКЦИИ КОММУТИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

1. Цель работы

Ознакомиться с конструкциями коммутирующих элементов вакуумных систем.

2. Теоретические сведения

Вакуумные системы имеют следующие виды коммутирующих элементов: трубопроводы, неразборные соединения, разборные соединения, натекатели, клапаны, затворы, электрические вакуумные вводы, устройства для передачи движения в вакуумный объем и смотровые окна.

Трубопроводы соединяют элементы вакуумных систем на каркасе установки. Они должны обладать достаточной механической прочностью, химической стойкостью, малой газопроницаемостью и незначительным газоотделением с внутренних поверхностей. Вакуумные трубопроводы могут быть жесткими и гибкими (рис. 1а и 1б). Гибкие вакуумные трубопроводы изготавливаются из сильфонов (гибких металлических трубок), резиновых или пластмассовых гибких шлангов. Для того, чтобы атмосферное давление не сжимало гибкие шланги, толщина их стенок делается равной внутреннему диаметру трубопровода для резиновых и одной четверти диаметра для полиэтиленовых трубопроводов. Соединения отдельных частей трубопроводов могут быть неразборными или разборными.

Неразборные соединения изготавливают методами сварки или пайки. Наиболее широко распространенным видом вакуумноплотной сварки металлов является газодуговая сварка в защитной среде. Этим способом соединяются детали из нержавеющей стали, меди, алюминия в среде аргона или гелия при толщинах 0,1-5 мм. На рис. 2 показаны конструк-

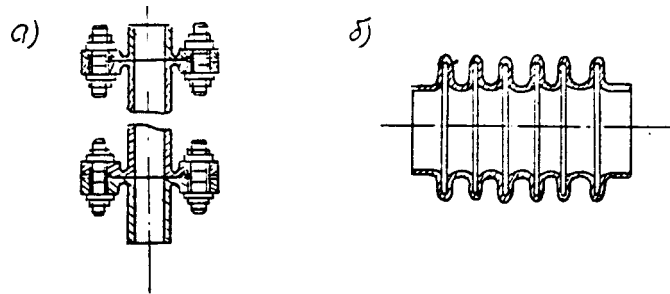


Рис.1

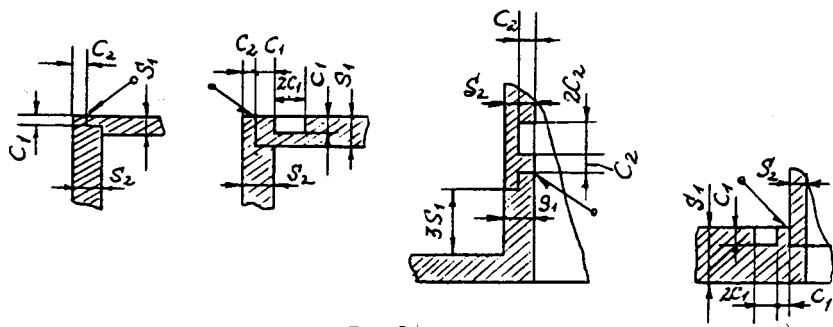


Рис.2

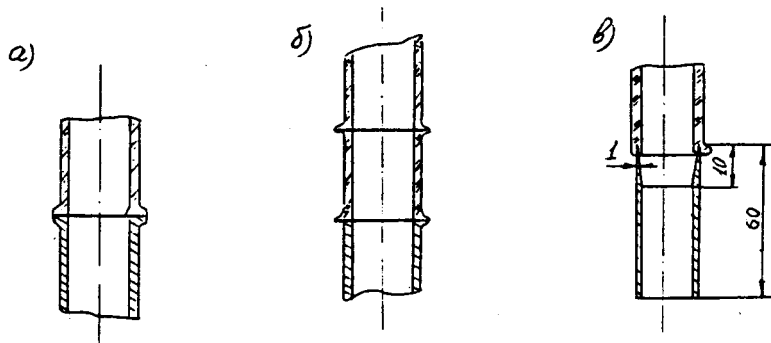


Рис.3

тивные особенности деталей, соединяемых сваркой, для некоторых угловых и стыковых швов. Сопряжения между свариваемыми деталями должны выполняться по скользящей посадке, необходимо также выдержать соотношения $C_1 \approx C_2 \approx 0,5S_1 \approx 0,5S_2$. Сварка ответственных соединений разнородных металлов размером менее 200 мм осуществляется электронным лучом в вакуумных камерах. Этим методом можно соединить нержавеющую сталь с медью и т.д.

Неразборное соединение металлических и стеклянных трубопроводов обеспечивается спаями металла со стеклом. При близких коэффициентах линейного расширения металлы / ковар/и стекла образуют согласованные спаи, конструкции которых показаны на рис. 3а. Соединения металла и стекла, имеющие различные коэффициенты линейного расширения, можно достигнуть применением нескольких переходных согласованных спаев (рис. 3б) или несогласованными спаями с увеличенной податливостью металлического элемента (рис. 3в). Максимальная рабочая температура спаев металла со стеклом обычно не превышает 500°C .

Спай металла с керамикой, кроме требований по коэффициентам линейного расширения, нуждаются в активных металлических припоях, вступающих в химическое взаимодействие с материалом керамики. Вакуумноплотное соединение керамики с металлом без применения активных припоев может быть достигнуто диффузионной сваркой в вакууме при температуре $0,5-0,7$ от температуры плавления металла и удельных давлениях $50-100 \text{ Н/см}^2$. Время диффузионной сварки $5-15$ минут. Максимальная рабочая температура спаев керамики и металла более 800°C .

Разборные соединения должны отвечать следующим требованиям: минимальное натекание и газовыделение, механическая прочность соединения, термическая стойкость соединения — способность выдерживать многократные прогревы без нарушения герметичности, способность сохранять герметичность после максимального числа циклов разборки и сборки, удобство ремонта и технологичность в изготовлении, возможность легкой проверки на герметичность. В зазор между соединяемыми деталями (фланцами и др.) обычно по-

мешается уплотнитель, податливость которого достаточна для заполнения неровностей при контактных напряжениях, значительно меньших предела упругости основных соединяемых материалов. Резиновые уплотнители (прокладки) широко применяются в системах низкого и среднего вакуума с температурой прогрева не более 180°C и допускают практически неограниченное число разборок и сборок при небольших удельных давлениях ($100\text{--}200\text{ Н/см}^2$). Усилие герметизации на единицу длины резиновых уплотнителей составляет $2,5\text{--}5\text{ Н}$ на 2 мм длины уплотнителя.

В технике высокого и сверхвысокого вакуума используются металлические уплотнения, допускающие прогрев до температуры $450\text{--}500^{\circ}\text{C}$ и требующие значительно больших удельных давлений. Для того, чтобы после прогрева уплотнения не произошло разгерметизации, необходимо постоянство коэффициентов линейного расширения всех входящих в уплотнение материалов во всем рабочем диапазоне температур. Медь и нержавеющая сталь наиболее полно отвечают этим требованиям, поэтому медь широко применяется в качестве прокладок между фланцами из нержавеющей стали. Усилие герметизации медных уплотнителей $200\text{--}300\text{ Н}$ на 1 мм длины уплотнителя. Наиболее распространенные схемы разборных соединений с резиновыми (а) и металлическими (б) уплотнителями в разобранном состоянии приведены на рис. 4.

Натекателями могут служить пористые материалы, проникаемые для отдельных газов, например, платина для водорода. Имеются прогреваемые натекатели, работающие на принципе изменения зазора между деталями с разными коэффициентами линейного расширения, и натекатели, основанные на микрометрическом перемещении иглы в конусном отверстии.

Вакуумные клапаны и затворы различаются по рабочему давлению, по способу герметизации (с уплотнителем и без уплотнителя), по типу привода (механические, электромеханические, электромагнитные, пневматические и гидравлические).

Вакуумные клапаны с диаметром условного прохода менее 100 мм применяются во всех случаях, когда не требу-

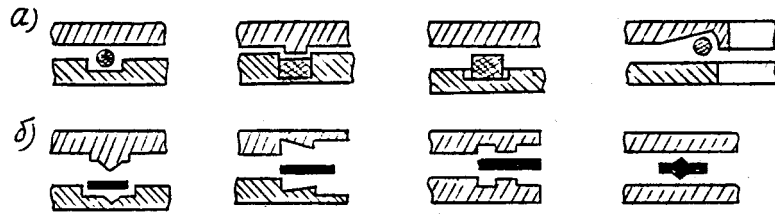


Рис. 4

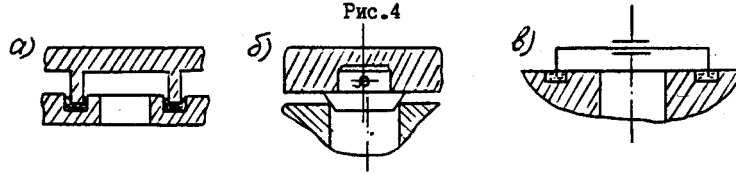


Рис. 5

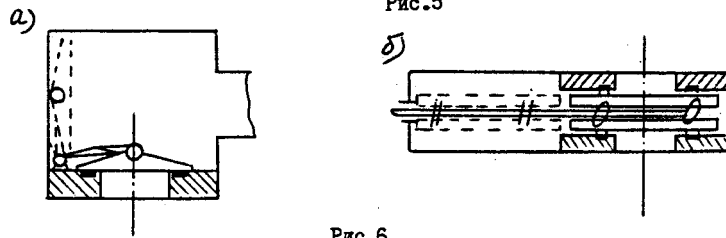


Рис. 6

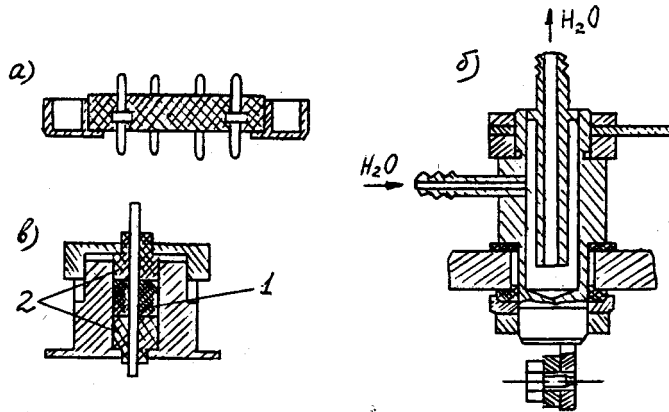


Рис. 7

ется применения трубопроводов с большой проводимостью. В металлических непрогрываемых вакуумных клапанах используются резиновые или фторопластовые уплотнители (рис. 5а). В прогреваемых конструкциях применяется герметизация за счет пластической деформации материала, например, конусного уплотнительного элемента (рис. 5б). Уплотнители с расплавляемыми металлами (обычно галлий, индий, олово или свинец) (рис. 5в) не требуют больших усилий для закрывания.

Вакуумные затворы служат для перекрытия трубопроводов больших проходных сечений. Схема поворотного затвора с диаметром условного прохода Ду 160 приведена на рис. 6а. Затворы с малыми осевыми размерами, освобождающие проходное сечение за счет перемещения уплотняющего элемента в направлении, перпендикулярном оси трубопровода (рис. 6б), называются шиберными затворами.

Электрические вакуумные вводы служат для питания электрическим током различных устройств, работающих внутри вакуумной камеры, и могут быть различными по конструкции в зависимости от величины вакуума, напряжения, силы тока и частоты. На рис. 7а приведена конструкция высоковакуумного металлокерамического ввода генераторной лампы, полученного с помощью пайки. На рис. 7в изображен непрогрываемый токовод для низковакуумных систем. Материалом для уплотнения 1 служит резина, а изоляторы 2 могут быть изготовлены из любых сортов вакуумной керамики. Сильноточный непрогрываемый ввод с водяным охлаждением показан на рис. 7б.

Устройства для передачи движения в вакуумный объем в зависимости от схемы конструкции уплотняющего элемента бывают с сальниковыми уплотнительными элементами, с гибкими уплотнительными элементами и с передачей движения через неподвижную перегородку.

К первому типу относятся вводы поступательного и вращательного движения в системы низкого и среднего вакуума, они обеспечивают передачу больших моментов и усилий, но с малыми скоростями (рис. 8а). Вал (1) уплотняется в обойме (2) резиновыми прокладками (3) при помощи гайки

(4) и металлического кольца (5). Для снижения трения на вал одевается тонкостенная фторопластовая втулка (6).

Вводы с гибкими элементами используются для передачи колебательного и вращательного движения (рис. 8б) или поступательного движения (рис. 8в). На рис. 8б движение передается через систему шарниров и сильфон (1). На рис. 8в вращательное движение резьбового стержня (1) переходит в поступательное движение стержня (2), герметизация вакуумной камеры осуществляется с помощью сильфона (3).

Передачи движения с использованием магнитных устройств могут использоваться при любом разрезении и обеспечивают высокие скорости перемещения, но с малыми усилиями (рис. 8г). Внешний магнит (1) через герметичную стенку воздействует на внутренний магнит (2), который жестко соединен с валом, установленном на подшипниках (3).

Смотровые окна при давлениях выше $5 \cdot 10^{-5}$ Па могут уплотняться резиновыми или фторопластовыми прокладками. Полированный стеклянный диск 1 (рис. 9а) с помощью нажимного кольца 2 уплотняется через прокладку 3. Для наблюдения технологических процессов в сверхвысоком вакууме используются спаи стекла с металлом (рис. 9б). К коваровому цилиндру приварен с одной стороны фланец, с другой стороны припаян стеклянный диск.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с конструкциями предложенных элементов вакуумных систем. Начертить эскизы элемента и кинематические схемы приводов (условные обозначения элементов кинематических схем приведены в табл. 1).

3.2. Описать принцип действия элемента, работу передаточного механизма и привода.

4. Содержание отчета

- 4.1. Эскизы изученных элементов вакуумных систем.
- 4.2. Описание принципа действия.
- 4.3. Кинематические схемы приводов вакуумных элементов.
- 4.4. Описание работы привода элементов.

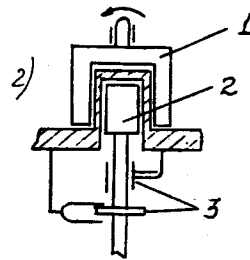
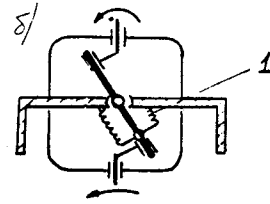
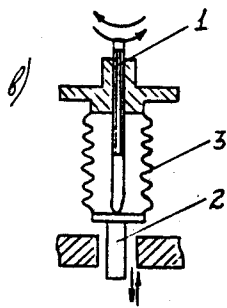
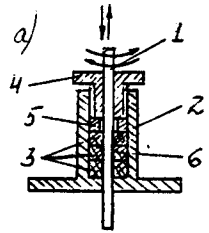


Рис.8

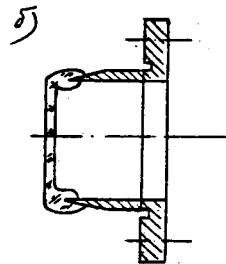
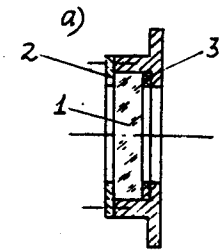


Рис.9

Таблица 1
Условные графические обозначения элементов в кинематических схемах.

Неподвижное звено		Гайка на винте, передающим движение а/неразъемная б/разъемная	
Кинематическая пара а/вращательная б/поступательная		Кулачки плоские а/ продольного перемещения б/вращающиеся	
в/винтовая		Кулачки барабанные а/цилиндрические б/конические	
г/цилиндрическая		Толкатель/ведомое звено а/зубчатое б/дуговой	
д/карданный шарнир е/сферическая/шаровая/		в/роликовый	
Подшипники скольжения а/радиальный б/радиально-упорные односторонние двухсторонние		Передача зубчатая реечная/общее обозначение/	
Подшипники качения а/радиальный б/радиально-упорные односторонний двухсторонний в/упорные односторонние		Передачи зубчатые а/внешнее зацепление б/внутреннее зацепление в/с пересекающимися осями/конические/ г/червячные с цилиндрическим червяком	
Муфта. Общее обозначение а/глухая б/упругая в/компенсирующая			

5. Контрольные вопросы

1. Преимущества и недостатки резиновых уплотнений по сравнению с металлическими.
2. Какие вводы движения можно рекомендовать для сверхвысоковакуумных систем?
3. Основные требования, предъявляемые к разборным вакуумным соединениям.
4. Какие типы уплотнительных элементов используются в низковакуумной запорной аппаратуре?
5. Каковы максимальные рабочие температуры спаек металла со стеклом и металла с керамикой?
6. Какие имеются разновидности гибких вакуумных трубопроводов?
7. В чем различие между вакуумным клапаном и затвором?
8. Каковы соотношения размеров в деталях, предназначенных для угловых и стыковых неразборных сварных соединений?
9. Какие вводы обеспечивают передачу поступательного движения в вакуум?
10. Чем отличается конструкция электрических вводов низковакуумных и сверхвысоковакуумных систем?

6. Литература

1. Розанов Л.Н. Вакуумные машины и установки. М., Машиностроение, 1975, 336 стр.
2. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. М., Энергия, 1979, 504 стр.

РАБОТА № 2

КОНСТРУКЦИИ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

1. Цель работы

Изучить конструкции механического, диффузионного, магниторазрядного и криоадсорбционного насосов.

2. Теоретические сведения

Современные вакуумные насосы позволяют получать разрежение в пределах 10^5 – 10^{-13} Па и подразделяются по величине достигаемого вакуума на высоковакуумные и низковакуумные, а по способу его создания – на объемные, струйные, ионные и сорбционные.

В настоящей работе рассматриваются конструкции насосов, используемые для получения давления ниже 10^2 Па и имеющие различный принцип действия:

1. Объемные насосы, работающие на перемещении газов за счет периодического изменения объема рабочей камеры.
2. Струйные насосы, захватывающие газ непрерывно вытекающей струей рабочей жидкости, газа или пара.
3. Ионные насосы, перемещающие ионизирующие молекулы и атомы газов в электрическом и магнитном полях.
4. Сорбционные насосы, связывающие молекулы газа непосредственно в объеме насоса за счет явлений хемосорбции, физической адсорбции или конденсации.

Объемные насосы имеют обычно движущие элементы для изменения объема рабочей камеры. Механический насос с масляным уплотнением пластинчато-роторного типа, схематически изображенный на рис. 1, относится к насосам объемного типа.

В цилиндрическом корпусе 1 с впускным 2 и выхлопным 3 патрубками эксцентрично расположен ротор 4, в пазу которого установлены пластины 5. При вращении ротора под действием центробежной силы пластины прижимаются к корпусу, обеспечивая изменение объема рабочей камеры насоса. В процессе работы зазоры в роторном механизме уплотняются заливаемым до определённого уровня маслом, которое

обеспечивает также смазку и охлаждение насоса. Для предотвращения заполнения маслом рабочей камеры служит клапан 6. Начальное прижатие пластины к поверхности статора осуществляется пружиной 7. Предельное давление механических насосов с масляным уплотнением составляет обычно $2,7 \cdot 10^6$ Па. Оно определяется перетеканием из камеры сжатия в камеру разряжения, упругостью паров рабочей жидкости и газовыделением деталей насоса.

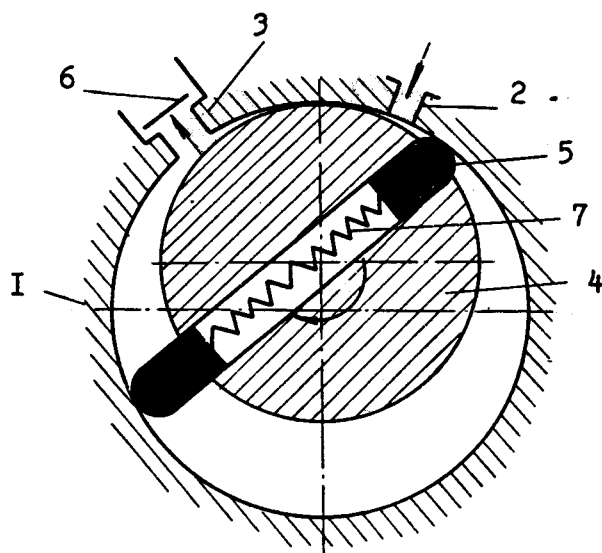


Рис. 1. Схема пластинчато-роторного насоса
 1 - корпус насоса; 2 - впускной патрубок; 3 - выпускной патрубок; 4 - ротор; 5 - пластина; 6 - клапан; 7 - пружина

Геометрическая быстрота действия S_r насосов с масляным уплотнением определяется частотой вращения ротора и объемом рабочей камеры

$$S_r = V_s \frac{n}{60}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где n - об/мин.; 500
 V_s - объем рабочей камеры насоса в м³.

Быстрота действия насоса S_H всегда меньше S_r из-за ограниченной проводимости входных коммуникаций в насосе и обратного потока газа

$$S_H = \eta S_r,$$

где η - коэффициент подачи, $\eta = 0,8-0,9$.

Струйный насос работает на принципе взаимодействия откачиваемого газа со струей пара рабочей жидкости. Существуют два типа сопел: диффузионные и эжекторные. Диффузионные сопла работают за счет диффузии откачиваемого газа в более плотную струю пара. В эжекторных соплах откачка газа осуществляется силами трения, возникающими между струей пара и газом. Диффузионные сопла эффективны при работе в области высокого, а эжекторные - в области низкого вакуума. Пароструйные насосы обычно имеют оба типа сопел, включаемых для повышения коэффициента компрессии последовательно, причем в качестве первых ступеней откачки работают диффузионные сопла, а в качестве выходных - эжекторные. Конструкция пароструйного насоса схематично показана на рис. 2. В лабиринтном кольце кипятильника 4 рабочая жидкость (масло, ртуть) при включенном нагревателе 3 разделяются фракции; легкие фракции испаряются на периферии кипятильника и поступают в диффузионное зонтичное сопло 2 и цилиндрическое эжекторное сопло 5. Тяжелые фракции поступают в центральную зону кипятильника, откуда питается паром высоковакуумное диффузионное зонтичное сопло 6. На стенках насоса, охлаждаемых водой, проходящей через рубашку 1, отработанные пары масла конденсируются и стекают в кипятильник. Для работы диффузионного насоса необходим насос предварительного разрежения, подсоединяемый со стороны эжекторного сопла. Откачные характеристики паромасляных насосов определяются как конструкцией насоса, так и родом рабочей жидкости. Теоретическая быстрота действия насоса S_u при молекулярном режиме течения

газа зависит от температуры и рода газа

$$S_r = \sqrt{\frac{R T_r}{2 \pi M}} A \left(1 - \frac{P_{np}}{P} \sqrt{\frac{T_r}{T_n}} \right), \text{ м}^3/\text{с}$$

$$P_{np} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Па}, P = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}, T_n = 673 \text{ К}, T_r = 293 \text{ К}$$

где T_n и T_r – температура газа в паровой струе и у входа в насос;

P_{np} и P – предельное и рабочее давления у входа в насос;

A – площадь кольцевого зазора между корпусом и кромкой верхнего сопла, м^2 ;

M – молекулярная масса газа, $M=29$;

R – универсальная газовая постоянная, $8,31 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{к моль}}$.

Истинная быстрота действия насоса S_n оказывается меньше теоретического значения из-за отражения части молекул газа от струи и противодиффузии газа в струе пара

$$S_n = H_0 S_r,$$

где $H_0 \approx 0,3$ – коэффициент захвата струи.

Предельное давление, достигаемое диффузионными насосами, лежит в пределах $10^{-5} \cdot 10^{-9}$ Па и зависит от обратной диффузии газа через паровую струю, давления насыщенных паров рабочей жидкости и газовой выделений деталей насоса.

Магниторазрядные насосы используют ионную и сорбционную откачку (рис. 3). Катод 1 образован двумя титановыми пластинами, анод насоса 2 с целью увеличения площади осаждения состоит из ячеек. Эта электродная система помещается в магнитное поле, направленное по оси катода. При подаче на электроды разности потенциалов в несколько киловольт в ячейках возникает разряд. Ионизированные разрядом атомы и молекулы ускоряются электрическим полем и внедряются в материал катода, расплывая его. При давлениях $\geq 10^{-1}$ Па ток разряда велик вследствие большой электропроводимости разрядного промежутка и, что-

бы разряд не перешел в дуговой, схему питания электродов включают балластное сопротивление. Активные газы (N_2 , O_2), попадая в свеженапыленную на анод пленку, связываются с титаном, образуя стойкие химические соединения (сорбционная откачка).

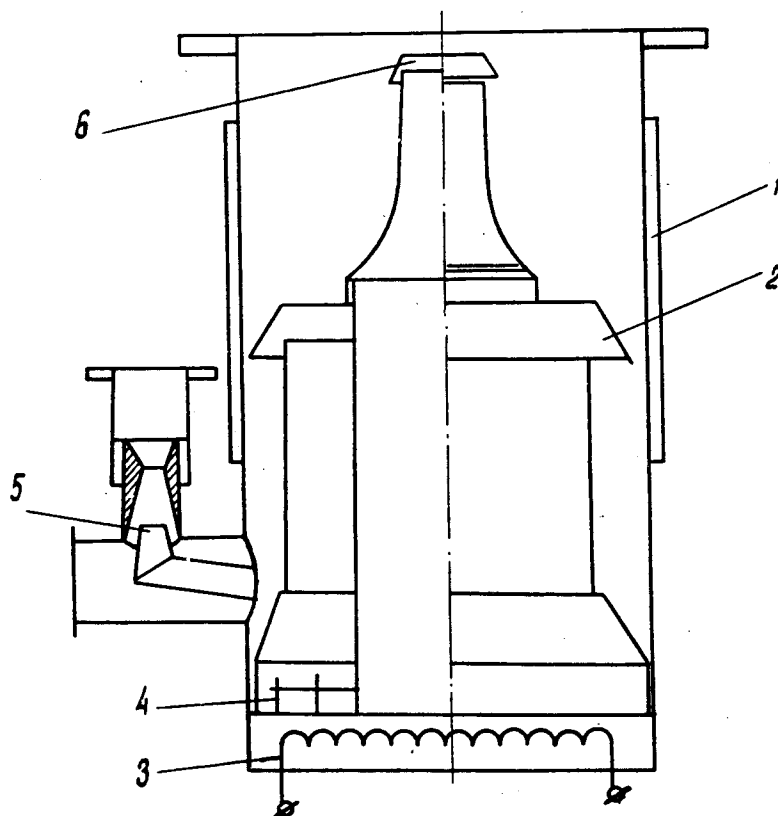


Рис. 2. Схема пароструйного насоса
 1 - рубашка охлаждения; 2,6 - диффузионные сопла; 3 - нагреватель; 4 - кипятильник; 5 - эжекторное сопло

Инертные и легкие газы, не образующие соединения с титаном, откачиваются благодаря внедрению ионов в катод (ионная откачка). При тщательном обезгаживании предель-

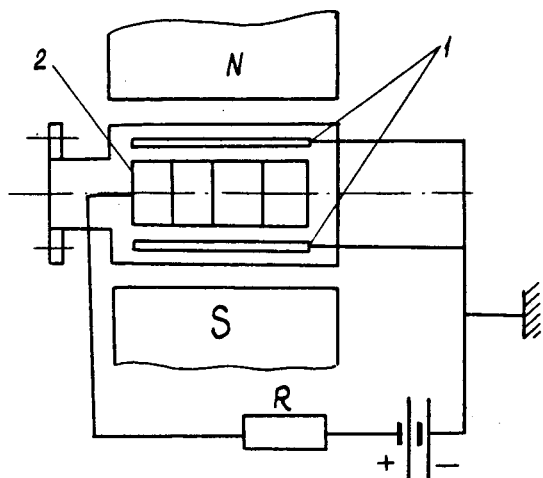


Рис. 3. Схема магнитоэлектрического насоса
1 - катод; 2 - анод

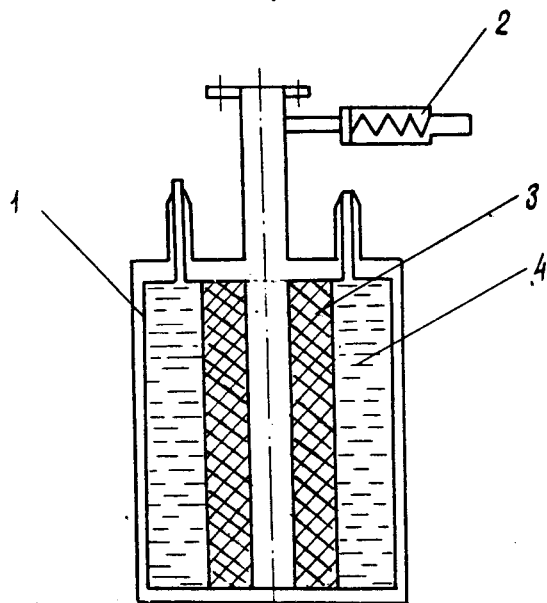


Рис. 4. Схема криоадсорбционного насоса
1 - внутренний сосуд Дьюара; 2 - клапан сброса;
3 - адсорбент; 4 - жидкий азот

ное давление насосов составляет 10^{-9} Па, при обычной эксплуатации – 10^{-7} Па. Предельное давление определяется равновесием поглощения и выделения газа на катоде и аноде. Верхний предел рабочих давлений связан с перегревом электродов насоса. Кратковременная работа насоса при его запуске возможна от давления 1 Па. Наличие загрязнений на электродах насоса, особенно органических, ухудшает откачные характеристики этих насосов, поэтому их предварительная откачка должна осуществляться безмасляными средствами создания вакуума.

Криoadсорбционный насос использует способности адсорбентов (углей, цеолитов и др.) в охлажденном состоянии поглощать газы и пары. Охлаждение адсорбента обычно осуществляется жидким азотом, заливаемым во встроенный или внешний (надвигаемый на корпус насоса) сосуд Дьюара. На рис. 4. изображена схема адсорбционного насоса периодического действия с встроенным сосудом Дьюара. В качестве адсорбента использован активный уголь 3 (в гранулированном виде), помещенный в центральной части внутреннего сосуда 1, который подвешен на 2-х тонкостенных трубках. Трубки снижают теплоприток к внутреннему сосуду и служат для заливки хладагента 4. При захолаживании адсорбента давление в насосе и откачиваемой системе снижается за счет физической адсорбции газа на поверхности адсорбента. При температуре 77К активный уголь эффективно поглощает все газы, входящие в состав атмосферы, за исключением водорода, неона и гелия, суммарное давление которых в атмосферном воздухе ≈ 5 Па. После насыщения адсорбента насос отсоединяется от вакуумной системы и освобождается от хладагента. Десорбция газов приводит к повышению давления в корпусе насоса и срабатыванию клапана сброса 2. Начальное значение быстроты откачки криоадсорбционного насоса

$$S_n = S_{max} \left(1 - \frac{U + K_{T_1}}{U + K_{T_2}} \right), \text{ л/с,}$$

где S_{max} - максимальная быстрота откачки, л/с

$$S_{max} = S_{yg} F$$

F - геометрическая откачивающая поверхность адсорбента, см²;

$$S_{yg} = 0,5 \div 1 \frac{\text{л/с}}{\text{см}^2}$$

$U = \frac{V_k}{V_a}$ - объемная нагрузка насоса;

V_k - объем откачиваемого объекта;

V_a - объем адсорбента в насосе;

K_{T_1}, K_{T_2} - коэффициенты адсорбируемости азота при температурах T_1 и T_2 , $T_1 = 293\text{K}$, $T_2 = 77\text{K}$; для активного угля СКТ-2 - $K_{m1} = 10^3$, $K_{m2} = 10^7$.

Предельное давление криoadсорбционного насоса зависит от свойств адсорбента, температуры хладагента, рода газа и объемной нагрузки. Его можно рассчитать по следующей формуле:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{нач}} \frac{U + K_{T_1}}{U + K_{T_2}}$$

где $P_{\text{нач}}$ - начальное давление откачиваемого газа.

3. Порядок проведения работы

3.1. Разобрать насосы на отдельные элементы и определить их назначение. Начертить принципиальную схему насоса.

3.2. Замерить размеры насоса, необходимые для расчета его быстроты действия.

3.3. Рассчитать быстроту действия и проводимость входного отверстия насосов. Проводимость входного отверстия

определяется по формуле для высокого вакуума $U_{вх} = 11,7A$ л/с, а для низкого вакуума $U_{вх} = 200A$ л/с, где A - площадь входного отверстия ($см^2$).

3.4. Определить коэффициенты захвата насосов

$$K = S_n / U_{вх}$$

3.5. Собрать насосы.

3.6. Ознакомиться с обозначениями насосов и других элементов вакуумных систем на рис. 5.6.

4. Содержание отчета

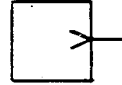
4.1. Принципиальные схемы и краткие описания принципа действия каждого типа изученных насосов.

4.2. Результаты расчета основных технических характеристик насосов.

5. Контрольные вопросы

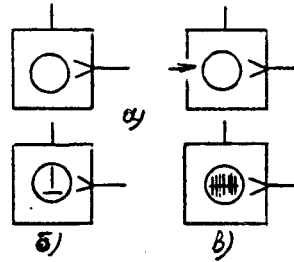
1. Какие основные типы вакуумных насосов вы знаете?
2. В чем разница в принципе действия эжекторных и диффузионных сопел?
3. Чем определяется геометрическая быстрота действия объемных насосов?
4. В чем состоит принцип действия магниторазрядного насоса?
5. От каких конструктивных размеров зависит быстрота действия пароструйных насосов?
6. Для чего применяется жидкий азот в криoadсорбционных насосах?
7. Каково будет предельное давление криoadсорбционного насоса, охлаждаемого жидким азотом, при откачке азота и атмосферного воздуха от давления 10^5 Па?
8. Что такое коэффициент захвата насоса?
9. Каково назначение фракционирующего устройства в пароструйных насосах?

Насос вакуумный. Общее обозначение



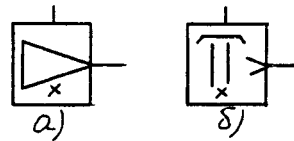
Насос вакуумный механический

- а) вращательный объемный без газобалласта и газобалластный
- б) двухроторный
- в) турбомолекулярный



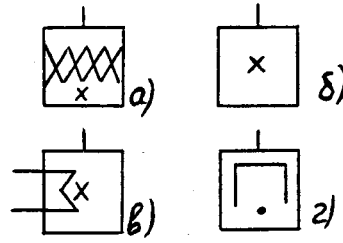
Насос вакуумный струйный

- а) эжекторный
- б) диффузионный



Насос вакуумный сорбционный

- а) адсорбционный
- б) испарительный геттерный
- в) криосорбционный
- г) магнитный электроразрядный
- д) испарительный ионный
- е) криогенный
- ж) комбинированный



Примечание. Вместо значка x может быть указана химическая формула рабочей жидкости и адсорбента

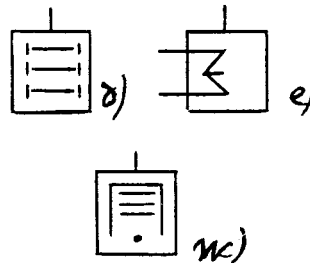
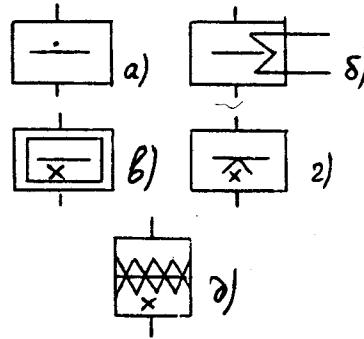


Рис. 5

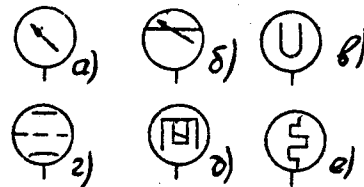
Ловушка (отражатель)

- а) общее обозначение
- б) охлаждаемая циркуляцией жидкости
- в) охлаждаемая жидкостью, заливаемой в резервуар
- г) термоэлектрическая
- д) сорбционная



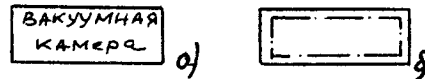
Вакуумметры

- а) общее обозначение
- б) деформационный
- в) жидкостной
- г) ионизационный
- д) магнитный электроразрядный
- е) тепловой



Камера вакуумная

- а) общее обозначение
- б) нагреваемая часть вакуумной системы.



Клапаны

- а) проходной
- б) угловой
- в) с задвижкой
- г) трехходовой
- д) дроссельный
- е) предохранительный
- ж) запорный быстродействующий на открытие
- з) запорный быстродействующий на закрытие
- и) натекаТЕЛЬ, клапан регулирующий.

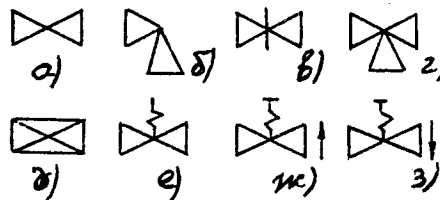


Рис. 6

10. Почему предварительное разряжение для магниторазрядных насосов должно создаваться безмасляными насосами?

6. Литература

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М., Высшая школа, 1982, 207 стр.

2. Основы вакуумной техники. Авторы: А.И.Пипко, В.Я.Плисковский, В.И.Королев, В.И.Кузнецов. М.: Энергоиздат, 1981, 432 стр.

РАБОТА № 3

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА

1. Цель работы

Изучить принципы действия, конструкции и правила эксплуатации теплового, ионизационного и магнитного вакуумметров.

2. Теоретические сведения

Приборы для измерения общих давлений в вакуумной технике называются вакуумметрами и, как правило, состоят из двух частей – манометрического преобразователя и измерительного блока. По методу измерения вакуумметры могут быть разбиты на две группы – абсолютные и относительные. Показания абсолютных вакуумметров не зависят от рода газа и являются функцией давления, непосредственно воздействующего на поверхность измерительного элемента. В приборах для относительных измерений используют зависимость некоторых физических процессов, протекающих в вакууме, от давления. Они нуждаются в градуировке по образцовым вакуумметрам для определения зависимости измеряемой величины от давления. Для работы во всем диапазоне давлений ($10^5 \div 10^{-12}$ Па), используемом в вакуумной технике, применяются различные типы преобразователей, отличающиеся по принципу действия и классу точности.

Тепловые преобразователи, применяемые для измерений давления в диапазоне $3 \cdot 10^{+3} \div 10^{-1}$ Па, используют зависимость теплопроводности разреженных газов от давления. Наиболее широко распространены термодарные преобразователи ПМТ-2 (стеклянный баллон) и ПМТ-4М (металлический баллон). В термодарном преобразователе (рис. 1 а) температура нити 1 измеряется термодарой 2. Термо-ЭДС термодары измеряется милливольтметром, ток накала нити регулируется реостатом и измеряется миллиамперметром.

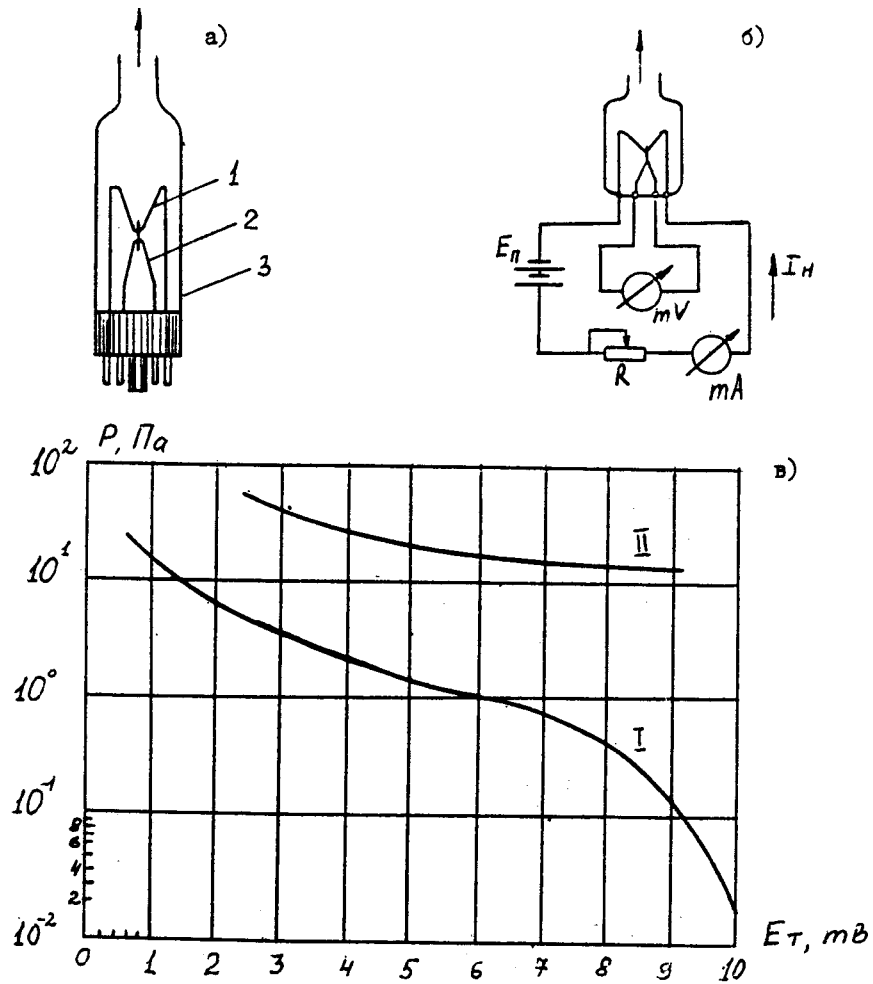


Рис. 1. Термопарный преобразователь ПМТ-2
 а - конструктивная схема: 1 - нить накала; 2 - термопара; 3 - баллон;
 б - схема измерения давления
 в - градуировочная характеристика в диапазоне давлений: 1 - $10^1 \div 10^{-2}$ Па; 2 - $10^2 \div 10^1$ Па

Передача тепла от нити 1 к баллону 3 происходит в соответствии с уравнением теплового баланса.

$$I_N^2 R = E_K + E_T + E_M + E_{\text{изл}}, \quad (1)$$

где I_N - сила тока, проходящего через нить;

R - сопротивление нити;

потери тепла за счет:

(1) конвекции - E_K ;

(2) теплопроводности газа - $E_T = K_T^1 (T_N - T_0) F$

где F - поверхность нити;

T_N - температура нити;

T_0 - температура баллона;

$K_T^1 = AP / (p + B)$ - коэффициент теплопроводности газа;

- p - давление газа в лампе;

A и B - постоянные коэффициента, зависящие только от рода газа;

при $p \gg B$ K_T^1 не зависит от давления,

если $p \ll B$, тогда $K_T^1 = \frac{A}{B} = K_T p$

3) излучение нити $E_{\text{изл}} = K_{\text{изл}} (T_N^4 - T_0^4) F$

$K_{\text{изл}}$ - коэффициент излучения материала нити;

4) теплопроводности материала нити $E_M = B (T_N - T_0) f$

B - коэффициент теплопроводности материала нити;

f - сечение нити.

Давление, измеряемое тепловым преобразователем, из

(1) при $p \ll B$

$$p = \frac{I_N^2 R - (E_{\text{изл}} + E_M)}{K_T (T_N - T_0)} \quad (2)$$

Нижний предел измерения соответствует условию

$I_N^2 R \gg E_{\text{изл}} + E_M$, а верхний - $p \approx B$.

В температурном преобразователе ПМТ-2 (рис. 1) поддерживается постоянный ток накала нити. В таком режиме работы изменение давления приводит к изменению температуры нити, которая измеряется термопарой. Величина тока накала подбирается таким образом, чтобы совместить показания прибора с отсчетом, соответствующим нижнему пределу измерения в области высокого вакуума.

В преобразователе сопротивления ПМТ-6 (рис. 2) для измерения температуры используется зависимость сопротивления нити от температуры. Он включается в мостовую схему. Ток накала нити I_n измеряется миллиамперметром, включенным в то же плечо моста, что и преобразователь, а температура нити — по току гальванометра в измерительной диагонали моста.

Показания тепловых преобразователей зависят от рода газа, однако шкалы приборов проградуированы по азоту (рис. 1в, 2в). Поэтому при измерении давления других газов показания прибора умножаются на коэффициент относительной чувствительности к данному газу (табл. 1).

Таблица 1

Газ	N_2	H_2	He	Ar	K_2	CO_2	CH_4	x_e
q	1	0,67	1,12	1,56	2,30	0,94	0,61	1,31

Ионизационные преобразователи работают на принципе ионизации остаточных газов термоэлектронами и измерении ионного тока, пропорционального давлению газа. Схема широко применяемого преобразователя ПМИ-2 приведена на рис. 3. Накаленный катод 1 имитирует электроны, которые направляются к аноду 2 и на своем пути ионизируют остаточные газы. За счет колебаний электронов около анода вероятность ионизации возрастает. Образовавшиеся ионы попадают на коллектор 3. Возникающий ионный ток усиливается и регистрируется измерительным блоком.

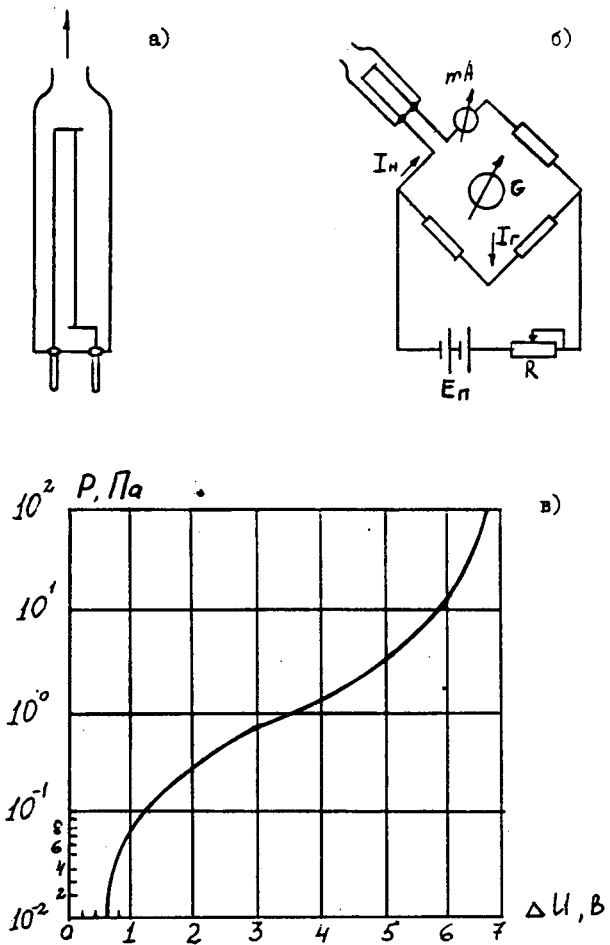


Рис. 2. Преобразователь сопротивления
 а) конструктивная схема;
 б) схема измерения давления;
 в) градуировочная характеристика

Уравнение преобразователя

$$I_{\text{и}} = K_{\text{и}} \cdot I_{\text{е}} \cdot p$$

где $I_{\text{и}}$ - ионный поток;

$I_{\text{е}}$ - электронный ток;

$K_{\text{и}}$ - удельная чувствительность преобразователя, имеющая постоянное значение для каждой конструкции при постоянных напряжениях на электродах.

Чтобы измеряемый ионный ток был пропорционален давлению, необходимо поддерживать постоянным электронный ток. Диапазон измерения ионизационного преобразователя $1 - 10^{-8}$ Па. Верхний предел измерения электронного преобразователя определяется отклонениями от линейной зависимости давления и ионного тока при высоких давлениях, когда длина свободного пробега электрона от катода к аноду становится соизмеримой с длиной свободного пробега электрона среди молекул газа. Нижний предел измерения определяется также отклонением от линейной зависимости за счет возникновения фонового тока фотоэлектронов, выбиваемых из коллектора рентгеновским излучением анодной сетки, бомбардируемой электронами с катода. Электронный ток $I_{\text{е}}$ для манометра ПМИ-2 составляет $5 \cdot 10^{-3}$ или $5 \cdot 10^{-4}$ А, а $K_{\text{и}} = 0,15$ 1/Па. Величина $\alpha = K_{\text{и}} \cdot I_{\text{е}}$ называется постоянной манометра.

Для уменьшения фоновых токов был разработан преобразователь с осевым коллектором (рис. 4), в котором катод и коллектор поменялись местами, что значительно уменьшило телесный угол, в котором рентгеновское излучение сетки попадает на коллектор. Это привело к расширению нижнего предела измерения давления до 10^{-8} Па.

Преобразователь аналогичной конструкции выпускается в стеклянном баллоне под названием ИМ-12 и на металлическом фланце - ПМИ-12.

Величина α для обоих преобразователей имеет значения порядка $1,3 \div 4 \cdot 10^{-4}$ А/Па при токе эмиссии $5 \cdot 10^{-3}$ А. Преобразователи ПМИ-2, используемые в комплекте вакуу-

Таблица 2

Тип прибора	N_2	H_2	He	N_2	CO_2	O_2	H_2	CH_4	Je	Ne	CO
-------------	-------	-------	----	-------	--------	-------	-------	--------	----	----	----

Электронный преобразователь

1	0,43	0,16	1,3	1,6	0,85	2,5	1,5	2,8	0,27	1,4
---	------	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	------	-----

Магнитный преобразователь

1	0,43	0,15	1,4	1,3	0,86	-	-	3,5	0,26	-
---	------	------	-----	-----	------	---	---	-----	------	---

метров ВИТ-2 и ВИТ-3, и ПМИ-12, ИМ-12, используемые в вакуумметрах ВИ-12 и ВИ-14, проградуированы по воздуху и для измерения давления других газов необходимо учитывать относительную чувствительность

$$R_r = \frac{K_r}{K_v}$$

где K_r - чувствительность преобразователя по измеряемому газу;

K_v - чувствительность по воздуху.

Тогда давление измеряемого газа равно

$$p = \frac{p_v}{R_r}.$$

В таблице 2 приведены данные по R_r для некоторых газов.

Магнитные преобразователи используют зависимость тока газового разряда во взаимопересекающихся магнитном и электрическом полях от давления и могут измерять давление в пределах от $1 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-12}$ Па.

Электродные системы, обеспечивающие поддержание самостоятельного газового разряда при высоком и сверхвысоком вакууме, бывают нескольких видов. Все электроды находятся в постоянном магнитном поле. На анод подается положительное относительно катода напряжение 2-6 кВ. Катод заземлен и соединяется со входом усилителя постоянного тока.

Ячейка Пеннинга (рис. 5а) состоит из двух дисковых катодов 1 и цилиндрического анода 2; в магнетронном преобразователе (рис. 5б) в отличие от ячейки Пеннинга катоды соединены между собой центральным стержнем; инверсно-магнетронном преобразователе (рис. 5в) центральный стержень выполняет роль анода, а наружный цилиндр становится катодом.

Свободные электроны, вылетающие из катода, в результате автоэлектронной эмиссии в ячейке Пеннинга двигают-

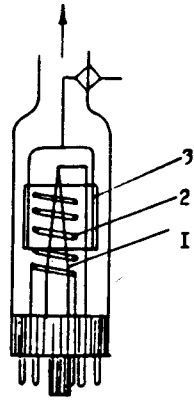


Рис. 3. Конструктивная схема электронного преобразователя ПМИ-2
1 - катод; 2 - анод; 3 - коллектор

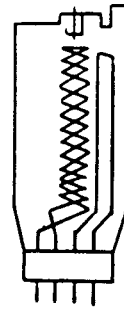


Рис. 4. Электронный преобразователь с осевым коллектором

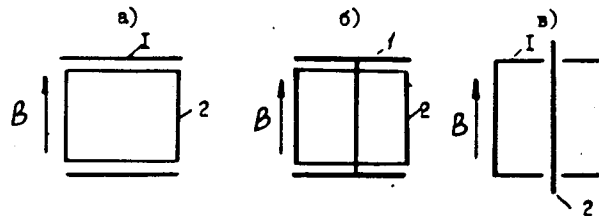


Рис. 5. Электродные системы магнитных преобразователей
а) ячейка Пеннинга; б) магнетронная; в) инверсно-магнетронная

ся по спиральным траекториям между катодными пластинами; а в магнетронном и инверсно-магнетронном преобразователях — по циклоиде. Электроны ионизируют газ, образовавшиеся ионы двигаются к катоду, образуя разрядный ток, по величине которого можно судить о давлении. Зависимость разрядного тока от давления описывается формулой:

$$I_p = K \cdot p$$

где K — чувствительность преобразователя по сухому воздуху (дается в паспорте на каждый прибор). Магнитные преобразователи так же, как и электронные, имеют неодинаковую чувствительность к различным газам, что объясняется различной эффективностью ионизации газов. Относительные чувствительности для магнитного манометра даны в таблице 2. Верхний предел измерения магнитных манометров определяется теми же причинами, что и у ионизационных. Нижний предел измерения определяется токами автоэлектронной эмиссии, а также задержкой во времени зажигания разряда при низких давлениях.

Преобразователь ПММ-14М (рис. 6) инверсно-магнетронного типа состоит из цилиндрического катода 1, смонтированного на центральном металлокерамическом вводе. Анод 2 изготовлен из вольфрамовой проволоки $\varnothing 0,25$ мм и может прогреваться прямым пропусканием тока. Анод проходит по оси катода через отверстия в его торцевых поверхностях. Между катодом и вводами анода расположены два экрана в виде пластин. Эта система электродов помещается в осевое магнитное поле — $1,4 \cdot 10^5$ А/м; на анод подается напряжение 6 кВ; катод, который является коллектором ионов, соединяется с входом усилителя постоянного тока, экраны 3 заземляются. Преобразователь ПММ-14М комплектуется с вакуумметрами ВИМ-1 и ВИМ-2А. Преобразователь ММ-32-1 магнетронного типа является датчиком вакуумметров ВМБ-6 и ВМБ-8, предназначенных для измерения давления и вакуумной блокировки (коммутация внешних агрегатов при изменении давления). Градуировочная кривая для преобразователя ММ-32-1 изображена на рис. 7.

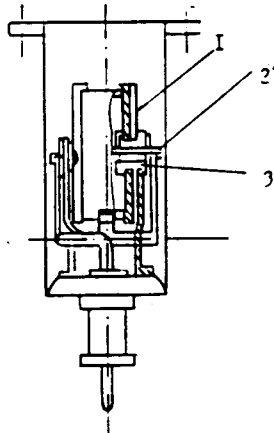


Рис. 6. Магниторазрядный преобразователь ПММ-14М
 конструктивная схема; 1 - катод; 2 - анод; 3
 экран

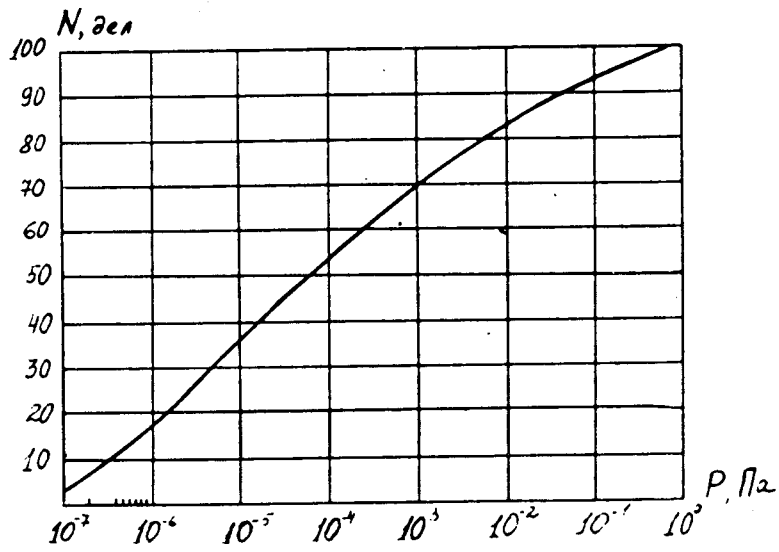


Рис. 7. Градуировочная кривая преобразователя ПМ-32-1

3. Порядок выполнения работы

3.1. Изучить конструкцию термпарного преобразователя ПМТ-2 и работу прибора ВИТ-2 по измерению низкого вакуума по описанию вакуумметра. Определить ток накала нити в запаяной лампе ПМТ-2. Измерить рабочее давление в вакуумной системе.

3.2. Изучить конструкцию ионизационного преобразователя ПМИ-2 и работу прибора ВИТ-2 по измерению высокого вакуума по паспорту вакуумметра.

3.3. Измерить рабочее давление в вакуумной системе с помощью лампы ПМИ-2.

3.4. Изучить конструкцию магниторазрядного преобразователя ПММ-14М и работу прибора ВИМ-2А по паспорту вакуумметра.

3.5. Измерить рабочее давление в сверхвысоковакуумной системе с помощью датчика ПММ-14М.

4. Содержание отчета

4.1. Эскизы конструкций изученных преобразователей.

4.2. Основные технические характеристики использованных в работе вакуумметров.

4.3. Результаты измерения давления.

5. Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия тепловых вакуумметров.

2. Чем ограничивается верхний предел измерения тепловых манометров?

3. Чем ограничивается нижний предел измерения тепловых манометров?

4. Объясните принцип действия ионизационных манометров.

5. Чем определяется верхний предел измерения ионизационных манометров?

6. Чем определяется нижний предел измерения ионизационных манометров?

7. Объясните принцип действия магнитного манометра.

8. Чем определяется верхний предел измерения магнитного манометра?

9. Чем определяется нижний предел измерения магнитного манометра?

10. Почему тепловые, ионизационные и магниторазрядные манометры имеют неодинаковую чувствительность к различным газам?

6. Литература

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М., Высшая школа, 1982.

2. Ничипорович Г.А. Вакуумметры. М., Машиностроение, 1977.

3. Востров Г.А., Розанов Л.Н., Вакуумметры. Л., Машиностроение, 1968.

РАБОТА № 4

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ

1. Цель работы

Ознакомиться с принципом действия, конструкцией и порядком работы приборов для измерения парциальных давлений остаточных газов в вакуумной системе.

2. Теоретические сведения

При проведении научных исследований и оптимизации вакуумных технологических процессов требуется измерять не только общие, но и парциальные давления остаточных газов. Парциальным давлением называется часть общего давления смеси химически невзаимодействующих газов, которая создается в системе отдельно взятым газом. Приборами для измерения парциальных давлений – газоанализаторами служат статические и динамические масс-спектрометры.

Все масс-спектрометры характеризуются следующими основными параметрами:

1. Разрешающая способность – отношение M_e к наименьшему различаемому изменению массового числа ΔM_e

$$R_m = M_e / \Delta M_e$$

т.е. способность разделять ионы газов, близкие по массовым числам. Ширина пика ΔM_e измеряется на уровне 10 или 50% высоты пика. Разрешающая способность газоанализаторов находится в пределах 40–200 а.е. м.

2. Чувствительность – определяется как отношение изменения ионного тока в цепи коллектора к вызывающему его изменению парциальному давлению газа и выражается в А/Па. Чувствительность зависит от рода газа и находится в пределах от 10^{-6} до 10^{-3} А/Па.

3. Верхний предел измеряемых давлений – обуславливается отклонением от линейной зависимости между ионным

током и соответствующим ему парциальным давлением. Максимальные рабочие давления не превышают $10^{-1} \div 10^{-3}$ Па.

4. Нижний предел измеряемых давлений - минимальное абсолютное давление, измеряемое прибором. Порогом чувствительности называют относительное парциальное давление, которое может быть определено при данном отношении "сигнал/шум".

5. Диапазон регистрируемых масс.

При расшифровке спектрограмм остаточных газов возникают определенные трудности, так как масс-спектр большинства газов включает в себя не только пики молекулярных ионов, но также ряд пиков осколочных и многозарядных ионов. Решение этой задачи состоит в решении системы из "n" линейных уравнений вида:

$$I_j = \sum_{i=1}^n I_{ji} = \sum_{i=1}^n K_{ji} P_i, \quad (1)$$

где I_j - величина ионного тока, соответствующего j - массовому числу;
 I_{ji} - величина ионного тока i - газа, соответствующая j - массовому числу;
 K_{ji} - коэффициент абсолютной чувствительности по i - газу (для пика с j -массовым числом), связанный с коэффициентом абсолютной чувствительности масс-спектрометра по основному пику i -газа K_i соотношением $K_{ji} = \beta_{ji} K_i$ (величины β_{ji} приведены в табл. 1);
 P_i - парциальное давление i -газа.

Статические масс-спектрометры основаны на принципе ионизации газовых молекул и разделения полученных положительных ионов в зависимости от отношения массы иона к его заряду m/q . После ионизации газов в источнике ионов медленными электронами однозарядные ионы ускоряются вытягивающим напряжением в пространстве дрейфа с одинаковой для всех энергией $\frac{mV^2}{2} = Uq$. Отсюда ско-

рость иона после прохождения электрического поля:

$$v = \sqrt{\frac{2 U q}{m}}, \quad (2)$$

где q - заряд иона; обычно можно принять, что $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;
 m - масса иона.

Скорость иона обратно пропорциональна \sqrt{m} . В пространстве дрейфа при воздействии магнитного поля пучок ионов разделяется на группы ионов с одинаковыми массами, которые движутся по траекториям с различным радиусом. При этом только одна группа ионов попадает на неподвижно установленный коллектор. Меняя напряженность магнитного поля или ускоряющее напряжение в источнике ионов, можно изменять траекторию движения ионов, т.е. осуществлять развертку ионов по массам, последовательно направляя пучки ионов с различными массами на коллектор. Радиус, по которому движется ион в магнитном поле, можно определить из условия равенства центробежной и центростремительной силы $\frac{m v^2}{R} = B v q$, где центростремительной силой является сила Лоренца, возникающая при пересечении иона с зарядом q , движущимся со скоростью v , магнитосиловых линий поля индукции B . Таким образом, радиус вращения иона

$$R = \frac{m v}{B q}. \quad (3)$$

Сигналы с коллектора усиливаются и записываются регистрирующим прибором. В результате измерений ионных токов, соответствующих различным массовым числам ($M_e = M/n_q$, где M - молекулярная масса, выраженная в атомных единицах массы, n_q - число элементарных зарядов), получается масс-спектр (рис. 1).

К статическим масс-спектрометрам относится прибор МСД-1 - двухлучевой секторный магнитный масс-спектрометр, действующий автоматически. По команде, поступающей от ЭВМ, на ионный источник 1 (рис. 2) подается ускоряющее напряжение в виде двух последовательных импуль-

Относительно величины основных и сопутствующих пиков в масс-спектрах индивидуальных газов, β_{ji} .

Газ	Отношение массового и зарядного чисел иона, $j = \frac{m}{q}$																				
	2	3	4	12	13	14	15	16	17	18	20	21	22	28	29	32	36	40	44	45	46
H ₂	I	0,01																			
He	-		I																		
CH ₄	0,01			0,02, 0,06, 0,14	0,8	I															
H ₂ O	0,01						0,02, 0,25	I													
Ne										I	0,1										
N ₂						0,08								I	0,01						
CO				0,03										I	0,01						
O ₂							0,1								I						
F ₂										0,15								I			
CO ₂				0,04			0,08					0,02, 0,12							I	0,02	0,004

сов с экспоненциальным спадом, с амплитудой 1000 в, длительностью 0,1 или 1,0 с. При прохождении каждого импульса происходит развертка масс-спектра, и ионные токи поступают в два канала регистрации. Приемниками ионов служат вторичные электронные умножители 5 типа ВЭУ-1. Регистрация масс-спектра осуществляется в следующей последовательности: во время следования первого импульса включена измерительная цепь первого канала за диафрагмой 3, где регистрируются пики ионных токов в диапазоне $M_e = 2 \div 11$ а.е.м. Первый импульс обрывается при напряжении 100В, при подаче второго импульса включается второй канал за диафрагмой 4, регистрируя пики ионных токов в диапазоне $M_e = 12 \div 150$ а.е.м. Обработка результатов анализа производится ЭВМ по специальной программе. Чувствительность МСД-1 по азоту составляет $7,5 \cdot 10^{-4}$ А/Па, разрешающая способность $J_m = 80$, наименьшее измеряемое парциальное давление $1,5 \cdot 10^{-8}$ Па, наибольшее — $1 \cdot 10^{-2}$ Па.

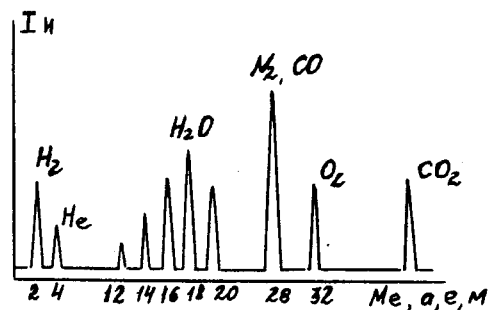


Рис. 1. Масс-спектр остаточных газов

Динамические масс-спектрометры отличаются от статических наличием переменных электромагнитных полей, частота или напряжение которых используется для разделения ионов по массам.

Динамический масс-спектрометр — измеритель парциальных давлений омега-атронный для разделения ионов по массам

использует движение положительных ионов во взаимно-перпендикулярных постоянном магнитном и высокочастотном электрическом поле. Ток эмиссии термокатода 1 (рис. 3) образует электронный луч по оси прибора, направленный параллельно магнитным силовым линиям, к аноду 3. Положительные ионы, образовавшиеся в электронном луче, движутся в высокочастотном электрическом поле, приложенном к двум пластинам 2 и 5. Коллектор 4, расположенный в вырезе нижней пластины, будет регистрировать только те ионы, для которых период вращения совпадает с периодом изменения электрического поля. Такие ионы называются резонансными, движутся они по траектории, представляющей собой раскручивающуюся спираль, радиус которой $R = E \cdot t / 2V$, где E — напряженность электрического поля. Остальные ионы вращаются вокруг электронного пучка, образуя пространственный заряд, который создает фоновый ток коллектора.

Развертка масс-спектрометра остаточных газов получается в результате изменения частоты высокочастотного напряжения. Период вращения резонансного иона

$$T = \frac{2\pi R}{v} \quad (4)$$

С учетом выражения (2) и (3) период вращения резонансного иона можно переписать в виде

$$T = \frac{2\pi m}{Bq} \quad (5)$$

Частота вращения резонансного иона $f = \frac{1}{T}$ или с учетом выражения (5).

$$f = \frac{Bq}{2\pi m} = \frac{\Omega}{2\pi}, \quad (6)$$

где $\Omega = \frac{Bq}{m}$ — циклотронная частота.

Разрешающая способность омегатрона обратно пропорциональна массе иона

$$\rho_m = q B^2 R_r / 2Em, \quad (7)$$

где R_k - расстояние от электронного луча до коллектора.
 При $\Delta M = 1$ а.е.м. $\rho_m = 35 \div 45$.

Чувствительность по азоту при электронном токе 10 мкА
 лежит в пределах $(4 \div 10) \cdot 10^{-7}$ А/Па.

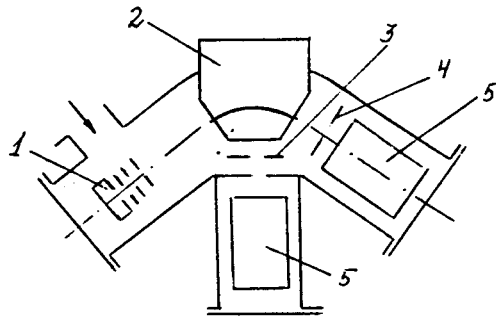


Рис. 2. Схема масс-спектрометрического преобразователя МСД-1
 1 - источник ионов; 2 - магнит; 3 - приемная диафрагма первого канала; 4 - приемная диафрагма второго канала; 5 - приемник ионов

Максимальное рабочее давление омегатрона $(1 \div 4) \cdot 10^{-3}$ Па,
 минимальное - 10^{-8} Па. Порог чувствительности 0,1%.

Для омегатрона решение системы уравнений (1) для смеси из 10 компонентов остаточных газов выглядит следующим образом:

$$P_{H_2} = \frac{1}{KN_2} (2,2 \cdot 1_2 - 2,8 \cdot 10^{-2} 1_{16} - 2,2 \cdot 10^{-2} 1_{18})$$

$$P_{He} = \frac{4,76}{KN_2} 1_4 \quad P_{CH_4} = \frac{1,87}{KN_2} 1_{15}$$

$$P_{H_2O} = \frac{1,54}{KN_2} 1_{18} \quad P_{Ne} = \frac{1}{KN_2} (3,3 1_{20} - 0,5 1_{40})$$

$$P_{N_2} = \frac{1}{KN_2} (13,7 1_{14} - 2,4 1_{16} - 0,1 1_{28} + 0,01 1_{44})$$

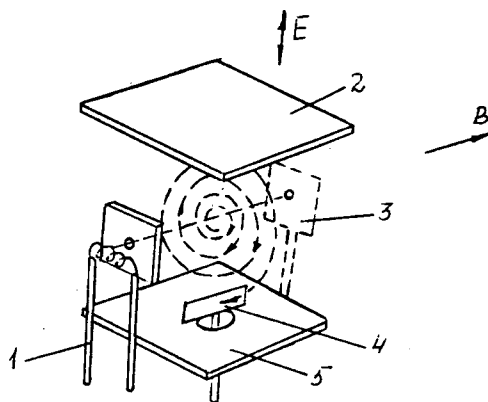


Рис. 3. Схема омегатрона
1 - катод; 2,5 - высокочастотные пластины; 3 - анод; 4 - коллектор

$$P_{CO_2} = \frac{1}{KN_2} (1_{28} + 2,18 1_{15} - 12,4 1_{14} - 0,12 1_{44}) \quad (8)$$

$$P_{O_2} = \frac{1,43}{KN_2} 1_{32}, \quad P_{A_2} = \frac{0,83}{KN_2} 1_{40}, \quad P_{CO_2} = \frac{0,73}{KN_2} 1_{44},$$

где K_{N_2} - коэффициент абсолютной чувствительности омегатрона по азоту, $K_{N_2} = 2 \cdot 10^{-4}$ А/торр.;
P - давление в торр.

3. Порядок проведения работы

3.1. Изучить работу прибора ИПДО-2. В комплект прибора входят: магнитно-юстировочное устройство с датчиком РМО-4С (рис. 4), высокочастотный генератор, блок питания, электронный усилитель, индикатор импульсов и электронный потенциометр ЭПП-09. Перед началом работы все блоки прогреваются в течение 30 минут.

3.2. Ручкой "ток луча" установить ток питания катода равным $2 \div 10$ мка в зависимости от давления в камере.

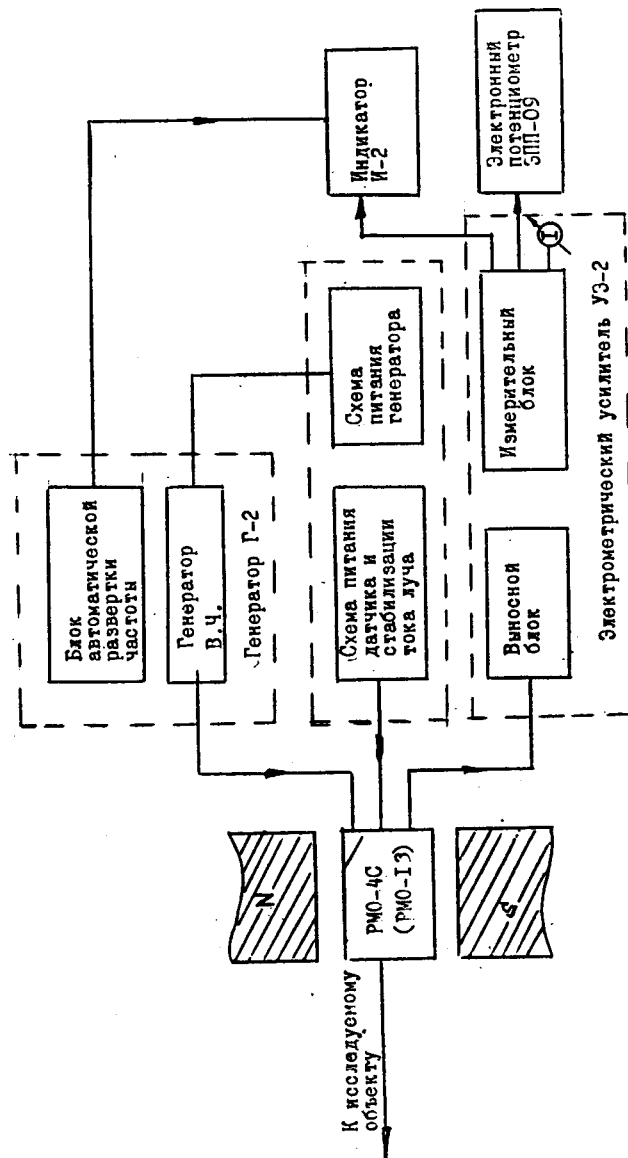


Рис. 4. Блок-схема прибора ИПДО-2

3.3. Провести предварительную регулировку генератора, для чего ручкой "частота" установить шкалу на нулевую отметку и ручкой "установка нулевых биений" добиться нулевых показаний вольтметра генератора.

3.4. Тумблер "Полоса обзора" переключить в положение 100%, ручкой "Яркость" на панели индикатора установить минимальное свечение светящейся точки.

3.5. Для записи спектрограммы необходимо первоначально, с помощью преподавателя, произвести настройку прибора по экрану индикатора, что позволяет достаточно быстро получить представление о качественной картине состава остаточных газов.

3.6. Предел измерения электрометрического усилителя выбрать в соответствии с ожидаемыми амплитудами пиков в спектре масс.

3.7. Для записи спектра масс в автоматическом режиме на потенциометре ЭПП-09 переключатель "Время развертки" следует установить в положение 100с, включить перемещение ленты самописца и кнопку "Пуск".

3.8. В процессе записи масс-спектра на ленте самописца следует отмечать используемые шкалы усилителя, частоту, при которой на ленте достигается максимум того или иного пика, а также параметры питания датчика.

3.9. По полученной спектрограмме определить из выражения $C = M_e \cdot f$ ($C=6,2$ - постоянная величина, M_e - массовое число, f - частота высокочастотного поля в мгц) принадлежность ионов к определенным массовым числам.

3.10. По уравнениям (8) вычислить парциальные давления остаточных газов в вакуумной системе.

$$C = 4,8$$

Таблица 2

Резонансная частота, f_p	Массовое число, M_e	Фоновый ток, I_ϕ	Величина пика, I_i	Величина тока, $I_i = I_i - I_\phi$
Мгц	а.е.м.	А	А	А

3.11. Определить общее давление в вакуумной системе путем суммирования парциальных давлений отдельных компонентов.

3.12. Результаты измерений и вычислений поместить в таблицы 2 и 3.

Таблица 3

Газ					
-----	--	--	--	--	--

Парциальное
давление

4. Содержание отчета

- 4.1. Блок-схема омегатрона.
- 4.2. Описание принципа действия циклотронного газоанализатора.
- 4.3. Расчеты парциальных давлений каждого компонента остаточных газов и общего давления в объеме.
- 4.4. Таблицы 2 и 3 с результатами измерений и расчетов.

5. Контрольные вопросы

1. Каково назначение высокочастотного электрического поля в ИПДО-2?
2. Чем определяется верхний предел давлений, измеряемых омегатроном?
3. От чего зависит разрешающая способность омегатрона?
4. За счет чего происходит разделение ионов по массам в статическом масс-спектрометре?
5. Чем отличаются друг от друга статические и динамические масс-спектрометры?
6. Какие ионы в омегатроне считаются резонансными?
7. Что такое разрешающая способность масс-спектрометра?

8. За счет чего происходит разделение ионов по массовым числам в омегатроне?

9. В чем причина возникновения фонового тока в омегатроне?

10. Какие основные составляющие остаточных газов в вакуумных объемах?

6. Литература

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М., Высшая школа, 1982.

2. Аверина А.П., Левина Л.Е. Масс-спектрометрия разреженных газов. Методы и аппаратура течеискания. М., Машиностроение, 1977.

РАБОТА № 5

ТЕЧЕЙСКАНИЕ В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ

1. Цель работы

Ознакомиться с существующими методами контроля герметичности и изучить устройство и работу течеискателей ГТИ-3 и ПТИ-10.

2. Теоретические сведения

При сборке вакуумных систем очень часто не удается получить требуемое предельное давление в установке, что может являться следствием нарушения герметичности. Поиск места течи представляет определенные трудности. Выявление сквозных дефектов, которые в связи с их малостью не могут быть обнаружены визуально, может быть основано на различных физических явлениях: газовых законах, высокочастотном разряде, ионизации и т.д. Существуют следующие методы обнаружения течей: опрессовки, высокочастотного разряда, манометрический, палладиевого барьера, люминесцентный, галогенный, масс-спектрометрический, радиоизотопный, накопления.

Чувствительность течеискателя может быть выражена через поток пробного газа Q , через концентрацию пробного газа j в смеси газов, проходящих через течеискатель, и через парциальное давление пробного газа в течеискателе P :

$$K_Q = L/Q, \quad K_j = L/j, \quad K_P = L/P$$

при этом показания прибора записывают в делениях самой чувствительной шкалы.

Между чувствительностями K_Q , K_j , K_P в связи с тем, что $Q = P \cdot S_{эф} = Q_0 \cdot j$ могут быть записаны следующие соотношения $K_Q = K_P / S_{эф} = K_j / Q_0$.

где $S_{эф}$ - эффективная быстрота откачки пробного газа;

Q_0 - общий поток газа в течеискателе.

По чувствительности течеискателя и достоверному отсчету L_{min} , вдвое превышающему все случайные отклонения стрелки выходного прибора, связанные с нестабильностью самого прибора и фоновым потоком газа, можно определить минимальный поток газа Q_{min} :

$$Q_{min} = L_{min} / K_Q.$$

Для определения размера течи по ее проводимости необходимо знать характер потока газа через течь. Условный диаметр течи для вязкостного и молекулярного режима течения газа может быть подсчитан из выражений

$$d_B = \sqrt[4]{\frac{128 \mu_B \eta \ell}{\pi \frac{P_1 + P_2}{2}}}; \quad d_M = \sqrt{\frac{\mu_M \ell}{38,1 \sqrt{\frac{T}{M}}}};$$

d - условный диаметр течи [М], ℓ - длина канала (толщина стенки) [М]; $\frac{P_1 + P_2}{2}$ - среднее давление в трубо-

проводе [Па]; η - коэффициент динамической вязкости; $\eta = 1,82 \cdot 10^{-5}$ Н/м²·с.

За основу выбора того или иного режима течения при практических расчетах по приведенным выше формулам можно применять такие соотношения: при натекании $V < 10^{-4}$ м³Па/с - молекулярный режим, при $V \geq 10^{-4}$ м³Па/с - вязкостный режим.

В данной работе рассматриваются галогенный и масс-спектрометрический методы определения натеканий.

Галогенные течеискатели реагируют на попадание в них пробного газа и могут регистрировать минимальное натекание, равное 10^{-8} Па/с. Принцип работы ГТИ-3 основан на резком возрастании эмиссии положительных ионов с платинового электрода (накаленного до 800-900°С) в присутствии газов, содержащих галогены. Датчик прибора, помещенный в выносной щуп (рис. 1), представляет собой диод прямого

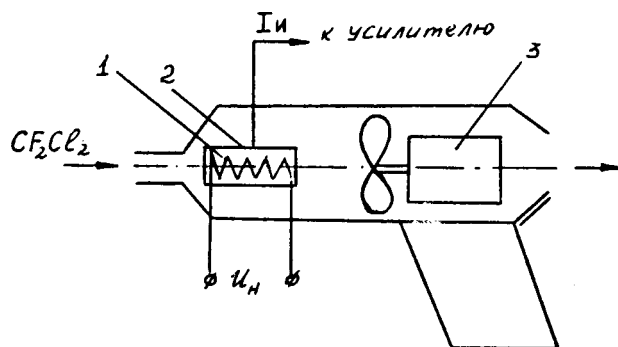


Рис. 1. Выносной щуп прибора ГТИ-3
1 - спираль; 2 - коллектор; 3 - вентилятор

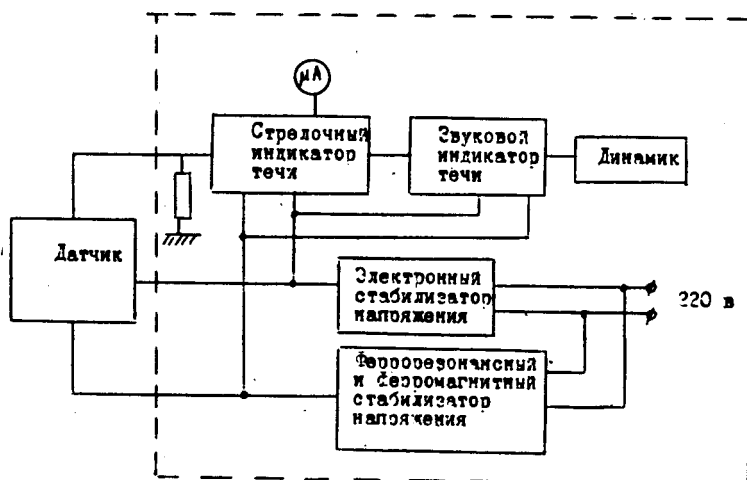


Рис. 2. Блок-схема течейскаателя ГТИ-3

накала, у которого имитирующим электродом служит платиновая спираль 1, а коллектором 2 - цилиндрический электрод, охватывающий нить накала.

Методика отыскания течи в герметичных системах с помощью ГТИ-3 предполагает заполнение обследуемой системы газом, содержащим галогены (фреон, четыреххлористый углерод и др.) в чистом виде или в смеси с воздухом до давления, немного выше атмосферного. Затем при низкой чувствительности прибора выносным щупом обследуются подозреваемые на течь места. В случае попадания в канал щупа пробного газа отклонится стрелка регистрирующего прибора и увеличится частота звукового сигнала (рис. 2). Если течейскаатель не реагирует на течь, то следует увеличить чувствительность прибора, постепенно повышая накал датчика. После каждого попадания галогена в датчик щуп необходимо удалять от течи до тех пор, пока стрелка выходящего прибора не возвратится в начальное нулевое положение.

Масс-спектрометрический метод определения натеканий является в настоящее время наиболее точным. В нем используется способность масс-спектрометра непрерывно регистрировать парциальное давление пробного газа в вакуумной системе. В качестве пробного газа используют гелий, хорошо проникающий в молекулярном режиме через капилляры и содержащийся в небольшом количестве в воздухе. Минимальные течи, обнаруживаемые этим методом, могут достигать 10^{-13} м³ Па/с.

Гелиевый течейскаатель ПТИ-10 является универсальным прибором, рассчитанным на контроль герметичности всех видов вакуумных систем и вакууммированных объектов в процессе их изготовления и эксплуатации. Минимальный регистрируемый поток гелия без дросселирования откачки не более $1,3 \cdot 10^{-11}$ (м³·Па)/с, с дросселированием откачки - $6,5 \cdot 10^{-13}$ (м³·Па)/с.

При проведении испытания на герметичность вакуумным методом предварительно откаченный испытуемый объем соединяется с масс-спектрометрической камерой течейскаателя и обдувается гелием или помещается в чехол, заполнен-

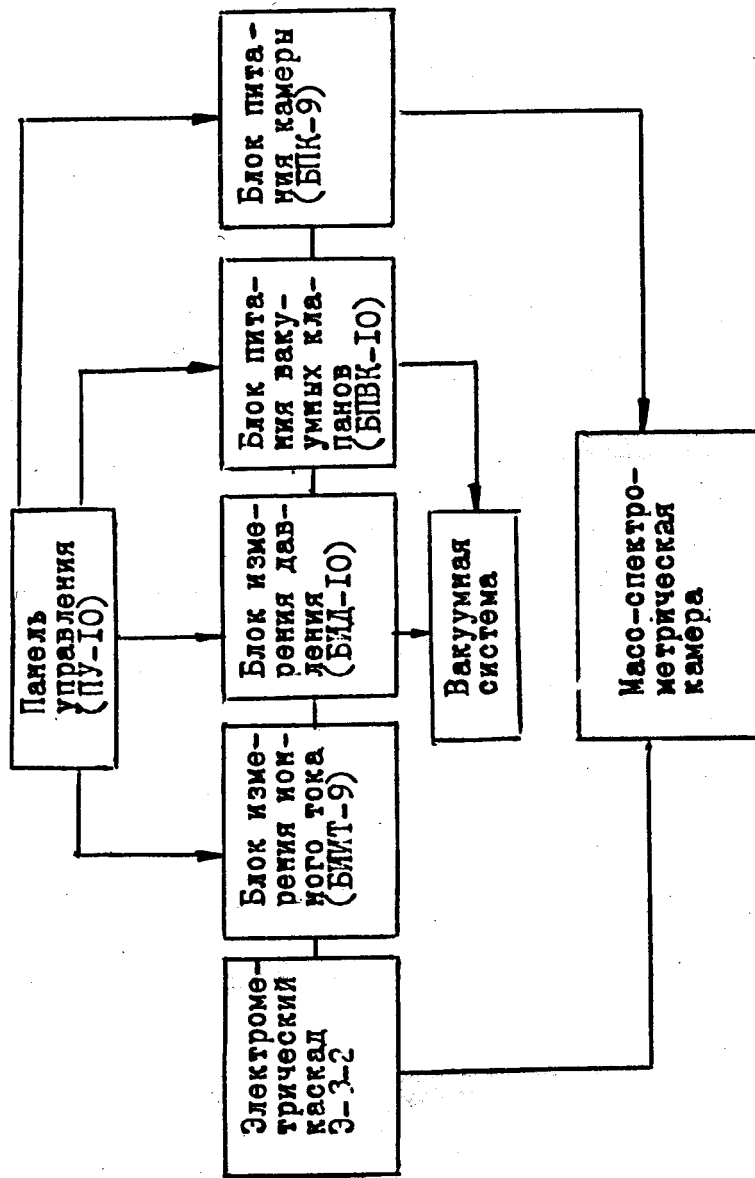


Рис. 3. Блок-схема течеискателя ПТИ-10

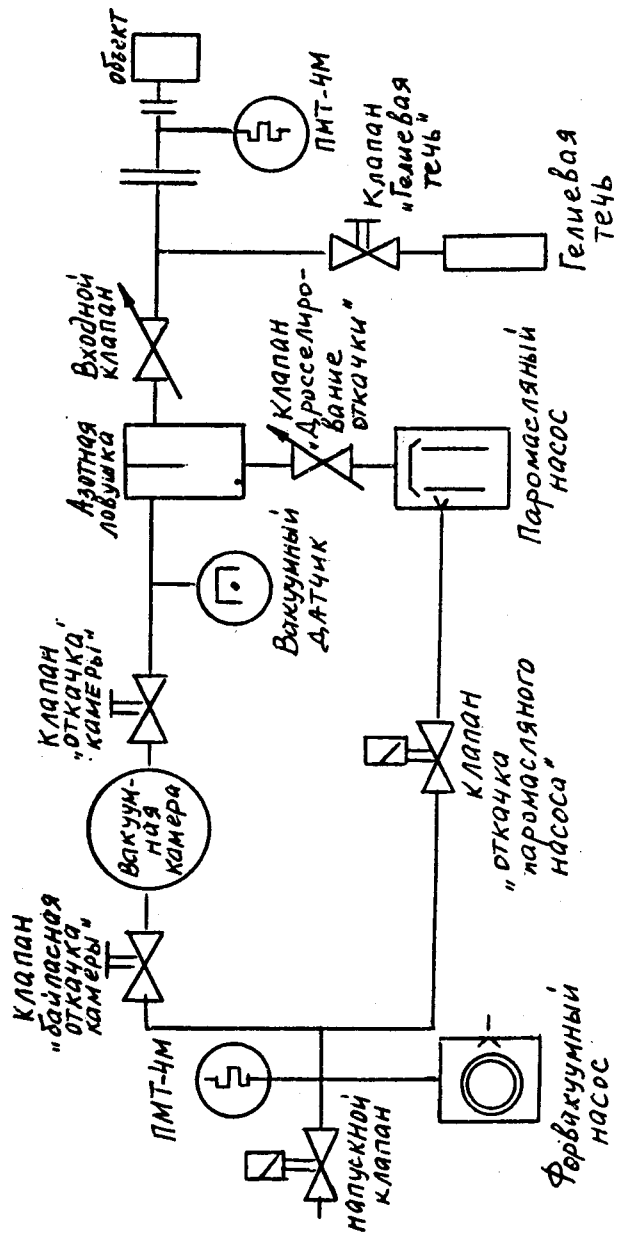


Рис. 4. Схема вакуумной системы ПТИ-10

ный гелием. Течь индуцируется по увеличению сигнала на измерительном приборе. Электронная схема течеискателя (рис. 3) состоит из блока измерения ионного тока (БИИТ-9) с выносным электрометрическим каскадом (Э-3-2), блока питания камеры (БПК-9), блока измерения давления (БИД-10), блока питания вакуумных клапанов (БПК-10) и панели управления (ПУ-10).

Вакуумная схема течеискателя ПТИ-10 (рис. 4) изображена на передней панели прибора. Запуск прибора осуществляется включением тумблера питания, при этом запускается форвакуумный насос. После нажатия кнопки "Откачка" срабатывает клапан "Откачка паромасленного насоса", а включением тумблера "Паромасленный насос" подается питание на нагреватель высоковакуумного насоса. Через 30 минут при открытом клапане "Дросселирование откачки" и при залитом в азотную ловушку жидком азоте показание прибора при измерении "Высокий вакуум" составит $2 \cdot 10$ делений, что соответствует давлению $5 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-3}$ Па.

После открытия клапана "Откачка камеры", нажатия кнопки "Блокировка", подачи питания в источнике ионов прибор настраивается на пик гелия по газу, поступающему из гелиевой течи. Настройка осуществляется выбором ускоряющего напряжения, соответствующего максимальному выходному сигналу.

Гелиевая течь предусмотрена для правильной оценки чувствительности течеискателя. Выбрав удобную для отсчета шкалу выходного прибора блока измерения тонного тока, определяют установившееся значение величины сигнала от гелиевой течи (α_r). Затем, закрыв клапан "Гелиевая течь", находят величину фонового сигнала (α_ϕ). Цена деления наиболее чувствительной шкалы выходного прибора соответствует

$$S_a = \frac{Q_r}{\alpha_r - \alpha_\phi} \left[\frac{\mu^3 \text{Па}}{\text{СМВ}} \right],$$

где $Q_r = 3,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ - величина потока гелиевой течи для данного прибора.

После определения чувствительности прибора приступают к поиску течей в исследуемом объекте, подсоединенном ко входу прибора. Откачав предварительно объект дополнительным форнасосом, плавно открывают входной клапан так, чтобы давление в камере не превысило 40–70 делений по измерительному прибору. Затем приступают к отыскиванию течей, обдувая объект гелием. Если не обеспечивается нужная чувствительность, то ее можно увеличить, прикрывая клапан "Дросселирование откачки".

Для индикации больших течей в течеискателе предусмотрена ступенчатая регулировка тока эмиссии ионного источника 5, 0,5 и 0,1 мА, что позволяет в 650 раз изменять чувствительность течеискателя. Максимальный рабочий поток через течеискатель ПТИ-10 не должен превышать

$$Q_{max} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{с}$$

Величина натекания при обнаружении течи оценивается по формуле

$$Q = S_a (\mathcal{L}'_r - \mathcal{L}_\varphi) \left[\frac{\text{м}^3 \text{ Па}}{\text{с}} \right],$$

где \mathcal{L}'_r и \mathcal{L}_φ – сигналы (мВ), обусловленные натеканием гелия из испытуемого объекта и фоном прибора.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с устройством и работой галогенного течеискателя ГТИ-3.

3.2. С помощью ГТИ-3 определить место натекания в предложенном для проверки элементе вакуумной установки.

3.3. Ознакомиться с устройством и работой гелиевого течеискателя ПТИ-10.

3.4. По гелиевой течи оценить чувствительность прибора. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	P Па	L_{ϕ} мВ	L_{τ} мВ	S_e
----------	---------	------------------	------------------	-------

где P – давление в камере анализатора перед открыванием гелиевой течи.

3.5. С помощью ПТИ-10 провести испытание на герметичность предложенного элемента вакуумной установки.

4. Содержание отчета

- 4.1. Описание принципа работы галогенного течеискателя.
- 4.2. Результаты определения герметичности.
- 4.3. Блок-схема гелиевого течеискателя.
- 4.4. Результаты по измерению чувствительности и величине натекания в испытуемый объект при работе с ПТИ-10.

5. Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы обнаружения течи?
2. Как можно осуществить градуировку течеискателей?
3. Каков принцип действия галогенного течеискателя?
4. Каков принцип действия масс-спектрометрического течеискателя?
5. Какие вы знаете виды чувствительностей течеискателя?
6. Как экспериментально определить чувствительность течеискателя?
7. Что такое диаметр условной течи?
8. С какой целью предусмотрена ступенчатая регулировка тока эмиссии ионного источника?
9. Почему гелий выбирают пробным газом?
10. Какие газы могут быть выбраны в качестве пробных в галогенном течеискателе?

6. Литература

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М., Высшая школа, 1982.
2. Аверина А.П., Левина Л.Е. Масс-спектрометрия разреженных газов. Методы и аппаратура течения. М., Машиностроение, 1977.

РАБОТА №6

ТИПОВЫЕ ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

1. Цель работы

Изучить типовые вакуумные системы. Собрать простейшую вакуумную установку из отдельных элементов вакуумных систем и арматуры.

2. Теоретические сведения

В зависимости от требуемой степени вакуума и особенностей технологического процесса могут быть выбраны различные способы откачки.

Типовой вакуумной системой для получения высокого вакуума можно считать систему на пароструйном и вращательном насосах (рис. 1).

В откачиваемом объекте 1 высокий вакуум $10^{-5} \cdot 10^{-3}$ Па создается пароструйным насосом 8. Ловушка 16, чаще всего охлаждаемая жидким азотом, снижает обратный поток паров рабочей жидкости из пароструйного насоса. Затвор 4, отключая объект 1, позволяет проверить эффективность вакуумной ловушки по манометру 5 и работоспособность пароструйного насоса по манометрам 6 и 7. Манометрические преобразователи 2 и 3, подключенные к откачиваемому объекту, измеряют вакуум в процессе откачки, а при отключенной вакуумной системе позволяют замерить скорость натекания и газовыделения в откачиваемом объекте.

Ловушка 10, снабженная манометром 9, охлаждается водой и снижает загрязнение высоковакуумного насоса парами рабочей жидкости вращательного насоса. Работоспособность вращательного насоса 14 может быть проверена при закрытых клапанах 12 и 15 по показаниям термометрического манометра 13. Клапан 15 применяется для напуска атмосферного воздуха в механический насос во время его остановки для предотвращения попадания рабочей жидкости насоса в вакуумную систему.

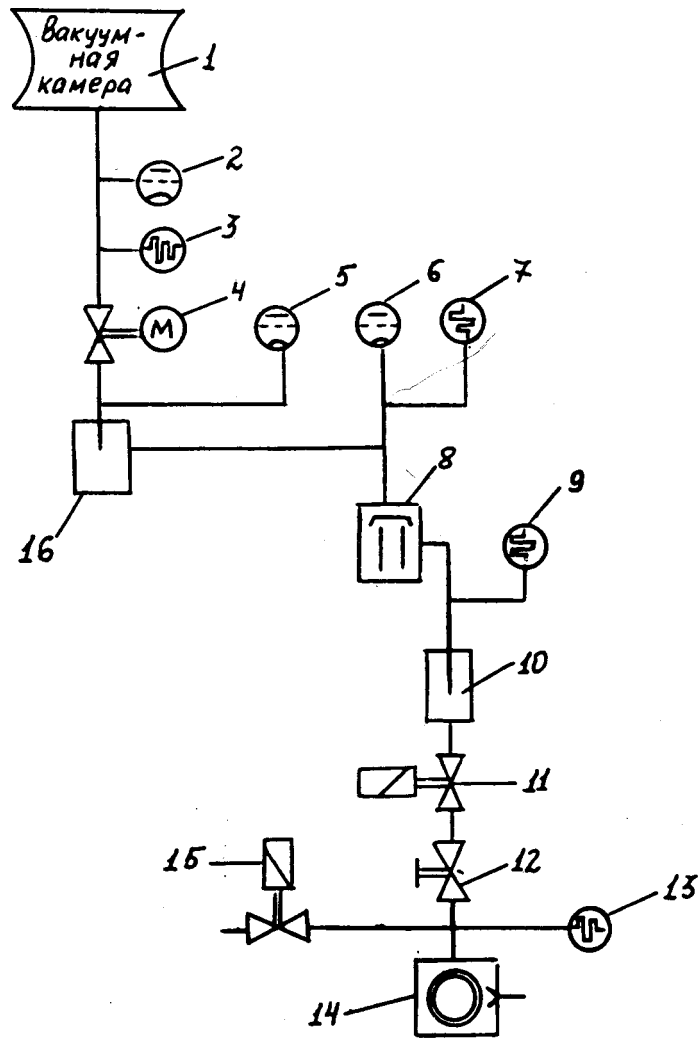


Рис. 1. Вакуумная система для получения высокого вакуума (10^{-2} - 10^{-5} Па) с применением пароструйного и вращательного насосов

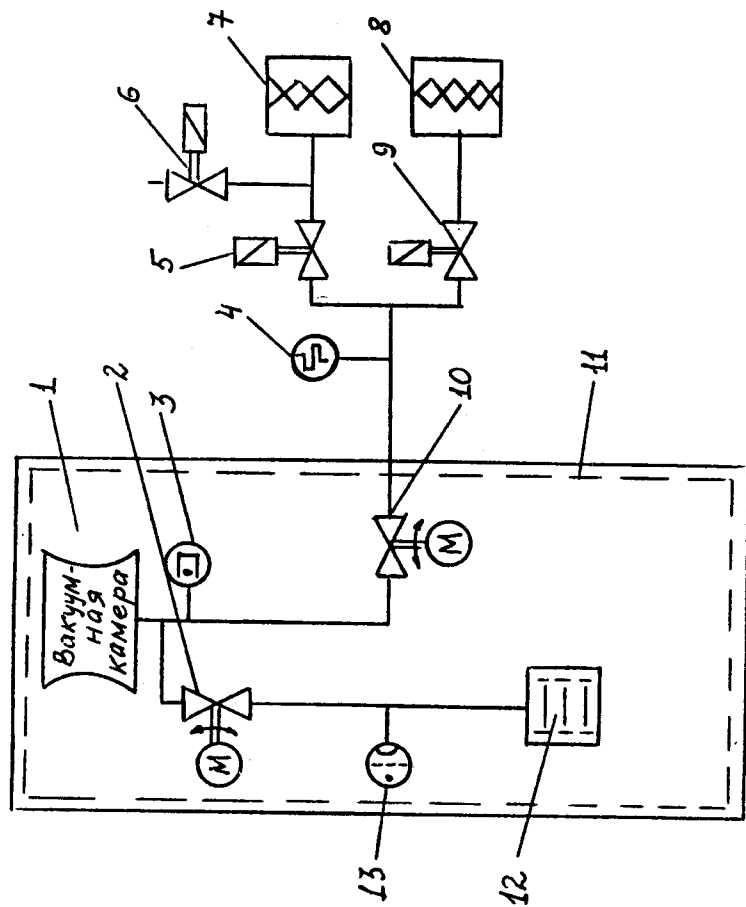


Рис. 2. Безмасляная система откачки магнитоэрядным и адсорбционным насосами

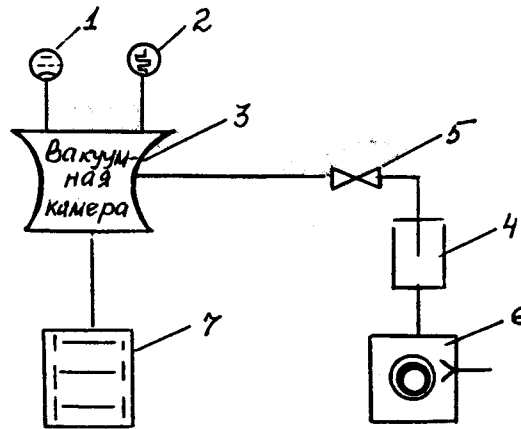


Рис. 3. Вакуумная система собираемой установки (1 вариант)
 1,2 - измерительная аппаратура, 3 - камера, 4 - ловушка, 5 - клапан, 6 - вращательный насос, 7 - магниторазрядный насос

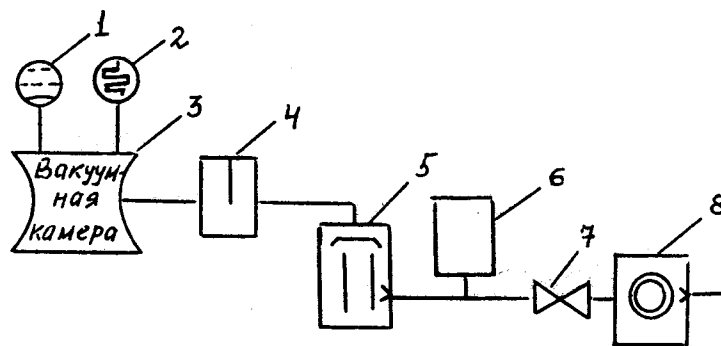


Рис. 4. Вакуумная система собираемой установки (II вариант)
 1, 2 - измерительная аппаратура, 3 - камера, 4 - ловушка, 5 - пароструйный насос, 6 - форбаллон, 7 - клапан, 8 - вращательный насос

Автоматический вакуумный клапан 11 закрывается при случайном отключении электросети и остановке вращательного насоса. Клапан 15 при этом автоматически напускает газ в насос. Клапан 12 позволяет дросселировать поступление воздуха во вращательный насос при длительной работе при высоких давлениях, что предохраняет насос от перегрева.

Наряду с высокой надежностью рассмотренная система имеет следующие недостатки: высокое предельное давление (выше 10^{-5} Па); загрязнение откачиваемой камеры парами рабочей жидкости насосов; большое количество вспомогательной арматуры; большой расход электроэнергии.

Параметры системы улучшаются с применением специальных сортов масел с низкой упругостью пара (10^{-3} – 10^{-9} Па при $T = 298\text{K}$) или с использованием двух азотных или одной адсорбционной ловушек.

Вакуумная система, представленная на рис. 2, в противоположность рассмотренной системе позволяет получать "чистый" безмасляный вакуум. Получение сверхвысокого вакуума осуществляется с помощью сорбционного 12 и двух последовательно работающих адсорбционных насосов, причем давление в камере 1 находится в пределах возможностей сорбционного насоса (10^{-5} – 10^{-9} Па). Обезгаживание сверхвысоковакуумной части системы, в которую кроме насоса и вакуумной камеры входят клапаны 2, 10 и манометры 3, 13, осуществляется с помощью нагрева печью 11 до температуры 300 – 400°C в течение 4–8 часов. Высокое давление во время тренировки и обезгаживания всей сверхвысоковакуумной системы (10^{-1} Па), по сравнению с давлением 10^{-3} – 10^{-4} Па для системы с масляными средствами откачки, не вызывает окисления деталей, так как спектр остаточных газов адсорбционных насосов содержит в основном инертные газы и водород.

Запуск и обезгаживание сорбционного насоса осуществляется адсорбционными насосами, один из которых 7 откачивает атмосферный воздух из объекта и вакуумной систе-

мы. Клапаны 5,9 предназначены для коммутации насосов, а клапан 6 – для выпуска откаченного газа в атмосферу. В связи с тем, что предельное давление агрегата из двух адсорбционных насосов, измеряемое манометром 4, равно 10^{-1} Па, в качестве сорбционного насоса 12 в схеме рис. 2 можно принять дуговые и магниторазрядные насосы, имеющие более высокое давление запуска. В схемах безмасляной откачки широко применяются магнитные манометры, плохо работающие в масляных системах из-за загрязнения электродов продуктами крекинга масла в газовом разряде.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Для выполнения работы необходимо собрать вакуумную систему, изображенную на рис. 3 или рис. 4. По 1 варианту система собирается из следующих элементов: рабочая камера 3 с манометрами ПМТ-2 и ПМИ-2; магниторазрядного насоса 7; ловушки 4; охлаждаемой жидкости азотом; клапана 5 и вращательного насоса 6. Соединение элементов осуществляется фланцевыми разъёмными соединениями.

3.2. После сборки системы соединить манометрические преобразователи с измерительными блоками.

3.3. Включить вращательный насос, открыть клапан 5 и по датчику ПМТ-2 следить за процессом откачки. Построить кривую откачки вакуумной камеры с вращательным насосом. При достижении давления 10 Па в ловушку 4 залить жидкий азот и перекрыть клапан 5.

3.4. В случае невозможности получить давление 10 Па по пункту 3.3 следует остановить насос 6, тщательно проверить все соединения и снова запустить насос.

3.5. Если после повторного запуска не удастся достичь требуемый вакуум, то систему при отключении питания необходимо проверить течеискателем ГТИ-3 согласно лабораторной работе № 5.

3.6. После устранения натекания атмосферного воздуха продолжить работу, начиная с п. 3.3.

3.7. После улучшения вакуума до 10^{-1} Па включить насос 7 и, измеряя давление по датчику ПМИ-2, построить

кривую откачки вакуумной камеры насосом 7, Выключить насос и снять зависимость повышения давления в камере от времени. Мгновенный газовый поток натекания и газовыделения $Q_c = V_k \Delta P / \Delta t$, где V_k - объем вакуумной камеры.

3.8. По II варианту (рис. 4) система собирается из следующих элементов: рабочая камера 3 с манометрами ПМТ-2 и ПМИ-2; пароструйного насоса 5, ловушки 4, охлаждаемой жидким азотом; форбаллона 6, клапана 7 и вращательного насоса.

3.9. Включить вращательный насос, открыть клапан 7 и по датчику ПМТ-2 следить за процессом откачки. Построить кривую откачки вакуумной камеры. При достижении давления 1 Па выключить пароструйный насос.

3.10. В случае невозможности получения давления 1 Па по п. 3.9 выполнить указания п.п. 3.4, 3.5, 3.6.

3.11. Залить жидкий азот в ловушку 4 и через 30 минут включить датчик ПМИ-2. Записать предельное давление, достигнутое в вакуумной камере.

3.12. Закрыть клапан 7, выключить вращательный насос, в течение 15 минут записывать показания датчика ПМИ-2. Выключить пароструйный насос и в соответствии с п. 3.7 снять зависимость повышения давления в камере от давления.

4. Содержание отчета

4.1. Схема и краткое описание работы собранной установки.

4.2. Кривые откачки вакуумной камеры вращательным и магниторазрядным насосами.

4.3. Расчет кривой газоотделения и натекания в рабочую камеру.

5. Контрольные вопросы

1. Из каких основных элементов состоит вакуумная система?

2. В чем особенности построения вакуумных схем с использованием сорбционных насосов?
3. Зачем применяются ловушки в вакуумных системах?
4. Как обеспечивается в вакуумных системах возможность проверки работоспособности насосов?
5. Как предотвратить проникновение рабочей жидкости вращательных насосов в вакуумную систему?
6. Как определить суммарное газовыделение и натекание в вакуумную камеру?
7. Почему магниторазрядные насосы не требуют постоянно работающего форвакуумного насоса?
8. Каково назначение ловушки между вращательным и пароструйным насосом?

6. Литература

1. Розанов Л.Н. Вакуумные машины и установки. М., Машиностроение, 1975.

РАБОТА № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРОТЫ ОТКАЧКИ НАСОСОВ И ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА

1. Цель работы

Изучить метод постоянного объема, определить экспериментально быстроту откачки насоса и проводимость элемента вакуумной системы.

2. Теоретические сведения

Метод постоянного объема является квазистационарным, так как вакуумная система в процессе определения быстроты откачки работает в неустановившемся режиме, т. е. проводимость насоса есть функция времени откачки. Экспериментальная установка для осуществления этого метода (рис. 1) достаточно проста и состоит из вакуумного насоса 8, ряда клапанов, трубопроводов и манометров.

Расчет быстроты действия насоса производится по кривой откачки $P = f(t)$ (рис. 2), которая экспериментально определяется для известной величины геометрического объема вакуумной камеры. Для расчета можно воспользоваться условием изотермичности процесса откачки:

$$PV = const \quad (1)$$

Дифференцируя уравнение (1), получим $p dV + V dp = 0$
откуда

$$dV = - \frac{V dP}{P} \quad (2)$$

Эффективная быстрота откачки объекта с учетом формулы (2) может быть записана в виде

$$S_H = \frac{dV}{dt} = - \frac{VdP}{Pd t} \quad (3)$$

Разделяя переменные в уравнении (3) и интегрируя по времени в пределах от t_1 до t_2 и по давлению от P_1 до P_2 , получим

$$S_H = 2,3 \frac{V}{t_2 - t_1} \lg \frac{P_1}{P_2} \quad (4)$$

Проводимостью элемента вакуумной системы называется коэффициент пропорциональности в уравнении потока газа.

$$Q = U (P_1 - P_2), \quad (5)$$

где U — проводимость элемента;
 P_1 и P_2 — давления на его концах.

Проводимость элемента численно равна газовому потоку при разности давлений на концах трубопровода равной единице. Проводимость измеряется в $\text{м}^3/\text{с}$, если поток измеряется в условных единицах массы PV .

Общее выражение для расчета проводимости и трубопровода может быть записано в следующем виде:

$$U = U_s + 0,9U_n, \quad (6)$$

где U_s — проводимость круглого трубопровода (диаметром и длиной l) в вязкостном режиме течения,

$$U_s = 1,35 \cdot 10^3 d^4 P_{cp} / l \text{ м}^3/\text{с}.$$

U_n — проводимость круглого трубопровода (диаметром d и длиной l) в молекулярном режиме течения $U_n = 121 d^3 / l \text{ м}^3/\text{с}$.

При откачке сосредоточенных объемов поток газа в любом сечении вакуумной системы остается постоянным и может быть рассчитан по уравнению

$$Q = S_i P_i, \quad (7)$$

где S_i и P_i - быстрота откачки и давление в произвольном сечении вакуумной системы.

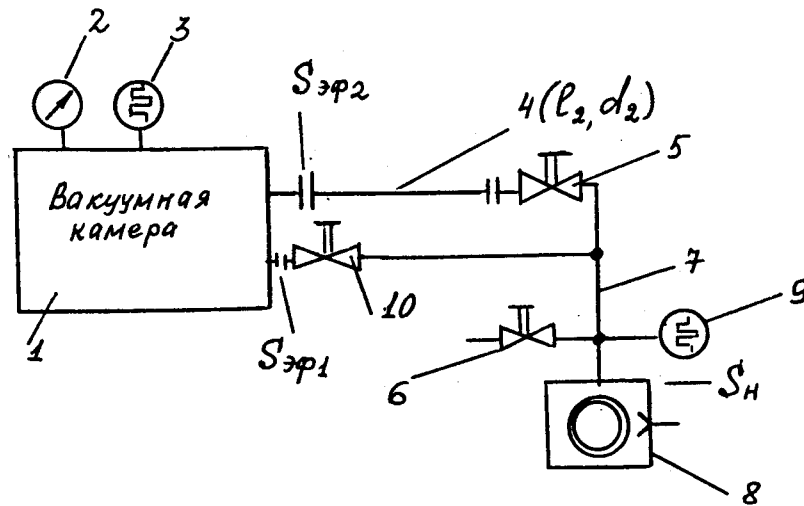


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
 1 - откачиваемый объект ($V = 0,086 \text{ м}^3$);
 2,3,9 - манометрические преобразователи;
 4 - дополнительный трубопровод ($l_2 = 460$, $d_2 = 6 \text{ мм}$);
 5,6,10 - клапаны;
 7 - основной трубопровод ($l_1 = 150 \text{ мм}$, $d_1 = 10 \text{ мм}$);
 8 - механический вакуумный насос

Рассматривая два сечения, в одном из которых быстрота откачки равна S_H , а во втором - $S_{эп}$, получим:

$$Q = S_H P_H = S_{эп} P. \quad (8)$$

Если проводимость трубопровода между двумя выбранными сечениями равна \mathcal{U} , то из уравнений (5) и (8) можно записать:

$$S_H = \frac{Q}{P_H} = \frac{\mathcal{U} (P - P_H)}{P_H}$$

$$S_{эф.} = \frac{Q}{P} = \frac{\mathcal{U} (P - P_H)}{P_H}$$

Откуда следует, что

$$\frac{1}{S_{эф.}} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{\mathcal{U}} \quad (9)$$

Уравнение (9) называют основным уравнением вакуумной техники, т.к. оно связывает между собой основные характеристики вакуумной системы: быстроту действия насоса S_H , проводимость трубопровода \mathcal{U} и эффективную быстроту откачки объекта $S_{эф.}$

3. Методика определения эксперимента

Откачиваемый объем 1 (см. рис. 1), заполненный атмосферным воздухом, подключается напрямую через клапан 10 к насосу. Клапан 5 при этом должен быть закрыт. Включив насос 8, записывается кривая откачки объекта 1 (зависимость давления в объекте по манометрам 2 или 3 от времени откачки). После того как в системе будет достигнуто предельное давление, насос выключается и вновь в откачиваемый объект через клапан 6 напускается атмосферный воздух. Затем эксперимент повторяется и вторично записывается кривая откачки, но при этом откачка осуществляется через трубопровод 4, проводимость которого определяется. При этом клапан 5 должен быть открыт, а клапан 10 - закрыт.

В результате проведенных экспериментов получены две кривые откачки, примерный вид которых показан на рис. 2. Графическим дифференцированием полученных кривых определим зависимости быстрот откачки объекта от давления, в первом случае быстроту откачки насоса, а во втором - эффективную быстроту откачки вакуумной камеры при откачке через трубопровод 4.

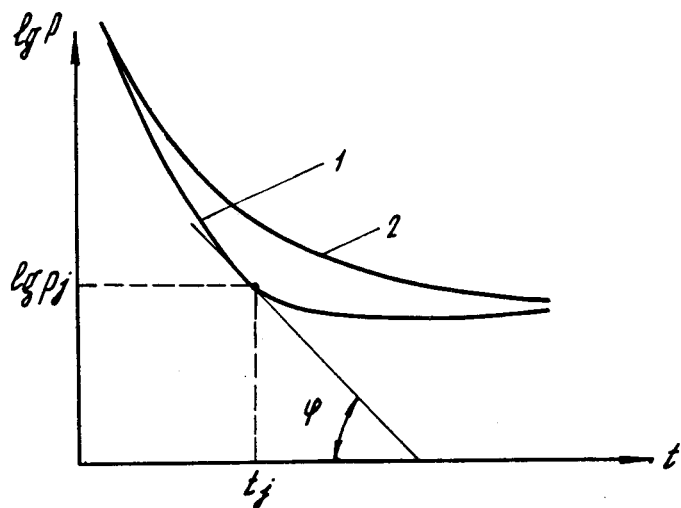


Рис. 2. Кривая откачки: 1 - первый эксперимент; 2 - второй эксперимент

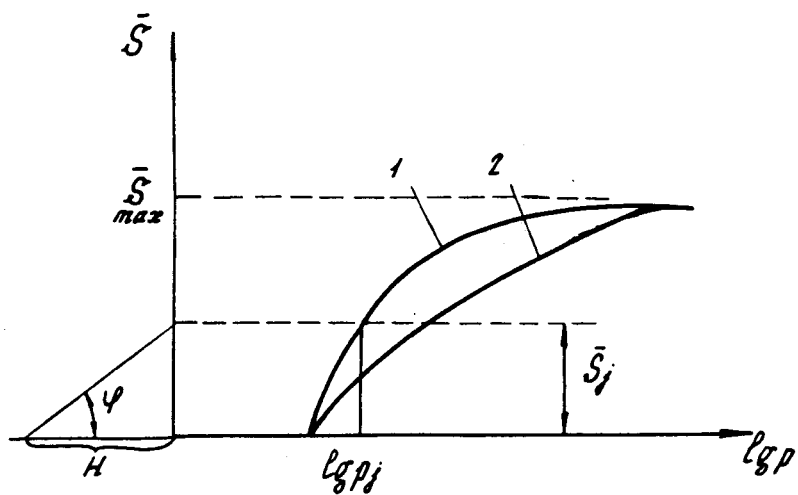


Рис. 3. Быстрота откачки: 1 - в первом эксперименте; 2 - во втором эксперименте

Перепишем уравнение (4) в виде

$$S_H = 2,3V \frac{\Delta \lg P}{\Delta t} = 2,3V \operatorname{tg} \varphi, \quad (10)$$

где
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta \lg P}{\Delta t}.$$

Для графического дифференцирования кривой $\lg P = f(t)$ отложим на рис. 3 отрезок H и из его конца проведем луч под углом φ до пересечения с осью S . Точка пересечения определит отрезок \bar{S} , который в некотором масштабе K_s изобразит быстроту откачки при давлении P_j в момент времени t_j .

Определим масштаб K_s . Пусть $K_t, K_{\Delta \lg P}$ — масштабы времени и логарифма давления; $\bar{S}, \Delta t, \Delta \lg P$ — отрезки, изображающие на графиках величины $S, \Delta t, \Delta \lg P$. Связь между указанными величинами и их изображениями

$$S = K_s \bar{S}, \quad \Delta t = K_t \Delta t, \quad \Delta \lg P = K_{\Delta \lg P} \Delta \bar{\lg P}. \quad (11)$$

На рис. 3 можно определить изображение быстроты откачки

$$\bar{S} = H \bar{\operatorname{tg}} \varphi, \quad (12)$$

где $\bar{\operatorname{tg}} \varphi$ — изображение $\operatorname{tg} \varphi$, $\bar{\operatorname{tg}} \varphi = \operatorname{tg} \varphi \frac{K_t}{K_{\Delta \lg P}}$.

Сравнивая выражения (10) и (12), найдем масштаб

$$K_s = \frac{S}{\bar{S}} = \frac{2,3V \operatorname{tg} \varphi}{H \bar{\operatorname{tg}} \varphi} = \frac{2,3V K_{\Delta \lg P}}{H K_t}.$$

Построив на рис. 3 кривые 1 и 2 и воспользовавшись уравнением (9), из которого следует, что $I/S_{3\varphi} = I/S_H + I/u_2$, построим зависимость $u_2 = \varphi(P)$ (см. рис. 4).

4. Порядок проведения работы

4.1. Ознакомиться с теоретической частью и изучить методику эксперимента.

4.2. Составить вакуумную схему установки.

4.3. Составить список используемой измерительной аппаратуры и выполнить необходимые предварительные градуировки.

4.4. Записать первую кривую откачки при подключении насоса к откачиваемому объекту без дополнительного трубопровода. Время фиксируется по секундомеру с момента включения насоса.

Результаты измерения записываются в таблицу.

	P_1	P_1	P_2	P_2
мин.	делений	Па	делений	Па
1	2	3	4	5

1.

2

3

4

5

10

15

20

30

4.5. Построить графики $P_1(t)$ и $P_2(t)$ (см. рис. 2).

4.6. Рассчитать масштаб K_s и построить графики $S_1(P)$ и $S_2(P)$ (см. рис. 3).

4.7. Рассчитать и построить графики $U(P)$ (см. рис. 4).

4.8. Рассчитать теоретически зависимость проводимости дополнительного трубопровода по формуле (6) и изобразить ее на рис. 4. Рассчитать погрешность экспериментальных исследований.

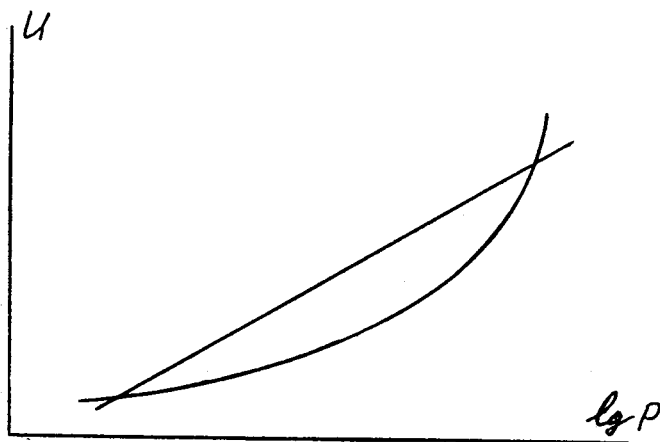


Рис. 4. Зависимость проводимости исследуемого трубопровода от давления: 1 - теоретическая; 2 - экспериментальная

5. Содержание отчета

- 5.1. Схема установки и ее описание. Назначение элементов схемы и список используемой измерительной аппаратуры.
- 5.2. Краткое описание методики эксперимента.
- 5.3. Таблица. Результаты измерений.
- 5.4. Расчет масштаба K_s .
- 5.5. Графики $P_1(t)$ и $P_2(t)$; $S_1(P)$ и $S_2(P)$; $U(P)$.
- 5.6. Выводы (сравнение теории и эксперимента).

6. Контрольные вопросы

1. Какой характер зависимости проводимости трубопровода от давления при вязкостном режиме течения газа?
2. Вывести основное уравнение вакуумной техники.

3. Как рассчитать масштаб быстроты откачки при графическом дифференцировании зависимости давления от времени откачки?

4. Чем объяснить расхождение экспериментальной и теоретической кривых зависимости проводимости трубопровода от давления?

5. Что такое проводимость элемента вакуумной системы?

6. Как теоретически рассчитать зависимость проводимости трубопровода от давления?

7. Расскажите методику экспериментального определения эффективной быстроты откачки насосов.

8. Что такое кривая откачки?

9. Чем определяется методическая погрешность измерения проводимости?

10. Каковы возможные причины появления случайной погрешности измерений?

7. Литература

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М., Высшая школа, 1982.

РАБОТА № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРОТЫ ОТКАЧКИ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ МЕТОДОМ ПОСТОЯННОГО ДАВЛЕНИЯ

1. Цель работы

В данной работе изучается методика определения основной характеристики вакуумных насосов – зависимости скорости действия от давления на входе в насос, которое используется в качестве исходных данных при расчете вакуумных систем. Измерения осуществляются стационарным методом постоянного давления, получившим широкое распространение для насосов с большой скоростью откачки, присоединенных к откачиваемому объекту сравнительно небольшого объема.

2. Теоретические сведения

В работе определяется скорость действия пароструйного вакуумного насоса в зависимости от рабочего давления. Пароструйный насос работает за счет взаимодействия паровой струи с молекулами откачиваемого газа. Обычно в насос устанавливаются несколько диффузионных и эжекторных сопел. Скорость действия насоса определяется первой ступенью диффузионной откачки.

$$S_n = S_{max} \left(1 - \frac{p_{np}}{p} \right), \quad (1)$$

где S_{max} – максимальная скорость откачки;
 p_{np} – предельное давление насоса;
 p – рабочее давление.

Максимальная скорость откачки определяется скоростью диффузии газа

$$S_{max} \approx \frac{U_{ap} \cdot 2L}{4} \cdot \frac{\Delta n}{d_{сф} + 2L} f, \quad (2)$$

где $U_{ар}$ - среднеарифметическая скорость газа;
 $d_{эф.}$ - эффективный размер откачиваемого объекта;
 Δn - разница концентраций газа во входном сечении насоса и в струе пара;
 L - средняя длина свободного пробега молекул газа;
 f - площадь проекции паровой струи на входное сечение насоса.

Зависимость быстроты откачки насоса от давления имеет вид, показанный на рис. 1. При низких давлениях, когда $P \rightarrow P_{пр}$, как это следует из формулы (1), S_n стремится к нулю. При высоких давлениях средняя длина свободного пробега молекул газа $L \rightarrow 0$, что приводит к тому, что S_{max} , как это следует из формулы (2), стремится к нулю, а, следовательно, и $S_n \rightarrow 0$.

3. Методика проведения эксперимента

Измерение быстроты действия вакуумных насосов может осуществляться в стационарном и нестационарном режимах. В данной работе используется стационарный метод измерения быстроты откачки, для которого характерно постоянство газового потока, откачиваемого насосом. О стационарности газового потока свидетельствует постоянство давления у входа в насос, т.е. измерения можно осуществлять только после того, как у входа в насос давление становится постоянным. В связи с этим этот метод измерения быстроты откачки получил название метода постоянного давления.

Этот метод имеет много разновидностей, отличающихся способом измерения величины потока газа, подаваемого в насос.

В настоящей работе определение потока газа осуществляется при помощи масляной бюретки. Вакуумная схема, используемая при эксперименте, изображена на рис. 2. Газ из баллона 8, снабженного редуктором 7, напускают в объем, откаченный предварительно форнасосом при открытом клапане 4. Давление в объеме напуска контролируется ма-

новакуумметром 6. Масляная бюретка 5 используется для измерения величины потока газа, поступающего в насос через натекатель 3 при закрытом клапане 4. Если давление напуска больше или равно атмосферному, то перепадом давлений внутри и снаружи бюретки при изменении в ней уровня масла можно пренебречь. Тогда поток газа, который направляют к испытуемому насосу 1 через натекатель 3, определяется только объемной скоростью подъема масла в бюретке и величиной атмосферного давления:

$$Q = P_{нап} \Delta V / t.$$

где $P_{нап}$ - давление в объеме напуска;
 ΔV - объем газа, откачиваемый из бюретки за время t .

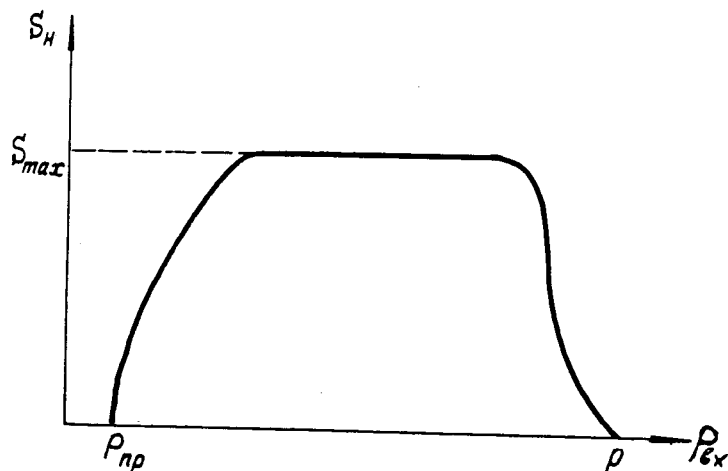


Рис. 1. Типичная зависимость быстроты откачки высоковакуумного насоса от давления

Манометр 2 измеряет давление газа P в измерительном колпаке, установленном на входе в насос. Быстрота действия насоса в месте подключения манометра определяется из условия стационарности потока

$$S_H = Q/P = P_{нал} \Delta V / (Pt).$$

Клапан 4 необходим для опускания масла в бюретке и повторении экспериментов. Регулируя натекателем величину потока газа, поступающего в насос, можно получить у входа в насос различные давления, что дает возможность построить основную характеристику насоса.

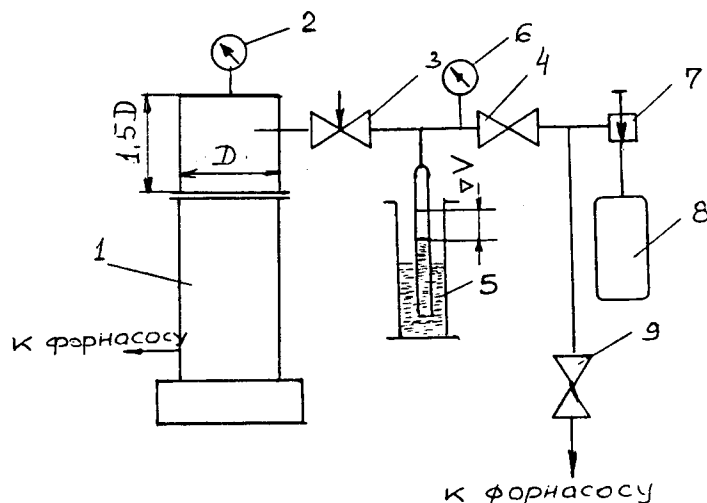


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 - насос; 2,6 - манометры; 3 - натекатель, 4,9 - клапана; 5 - бюретка; 7 - редуктор; 8 - баллон с газом

Метод постоянного давления используется обычно для насосов с большой быстротой действия, а схема на рис. 2 применяется при высоких давлениях у входа в насос.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Составить вакуумную схему установки и список используемой измерительной аппаратуры.

4.2. Запустить установку. Для чего включить форвакуумный насос и откачать всю систему до давления 1 Па, а затем запустить исследуемый высоковакуумный насос и обеспечить в системе предельное давление $10^{-4} \div 10^{-3}$ Па.

4.3. Предварительно через клапан 9 откачать до давления 1 Па и затем напустить газ в объеме напуска до атмосферного давления.

4.4. Начальное давление, которое установилось в измерительном колпаке, соответствует предельному давлению насоса $P_{пр}$. Открывая постепенно натекагель 3, устанавливают различные давления p . Для того, чтобы на графике было бы достаточное количество измерений, нужно настраивать давление так, чтобы последующее значение отличалось от предыдущего не более, чем в 2 раза. Давление p , время t и уровень подъема масла в бюретке записываются в таблицу. Диаметр бюретки равен 1 мм. Измерения повторить несколько раз (3-5 раз). Выключить установку.

№ п/п	$P, \text{Па}$	$t, \text{с}$	$\Delta h, \text{мм}$	$\Delta V, \text{м}^3$	$P_{нап}, \text{Па}$	$S, \text{м}^3/\text{с}$
-------	----------------	---------------	-----------------------	------------------------	----------------------	--------------------------

4.5. Построить график $S_n = f(P)$ по данным таблицы. Согласно приложению рассчитать методическую и случайную погрешности измерения скорости откачки.

4.6. Из графика $S_n = f(P)$ рис. 1 определить основные характеристики насоса: предельное давление $P_{пр}$, максимальную скорость откачки S_{max} и максимальное рабочее давление $P_{вып}$.

5. Содержание отчета

5.1. Схема установки с описанием названия и назначения всех элементов.

5.2. Список измерительных приборов и аппаратуры с указанием диапазонов и точности измерения.

5.3. Краткое описание методики измерений.

5.4. Таблицы результатов измерений и расчетов.

5.5. Выводы по работе, в которых должны содержаться результаты определения основных параметров насоса.

6. Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия исследуемого насоса?
2. Какие параметры характеризуют исследуемый насос?
3. В чем заключается метод постоянного давления для измерения быстроты действия насоса?
4. Что такое предельное давление насоса?
5. Что такое быстрота действия насоса?
6. От чего зависит методическая погрешность измерения газового потока?
7. Чем вызваны случайные ошибки при измерении быстроты действия насоса?
8. Как оценить минимальную и максимальную величины газовых потоков, которые могут быть измерены масляной бюреткой?
9. Чем определяется выбор величины давления в объеме напуска?
10. Почему метод постоянного давления относится к стационарным методам измерения быстроты откачки?

7. Литература

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М., Высшая школа, 1982.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Работа № 1. Конструкции коммутирующих элементов вакуумных систем.....	3
Работа № 2. Конструкции вакуумных насосов.....	13
Работа № 3. Приборы для измерения вакуума.....	25
Работа № 4. Приборы для измерения парциальных давлений.....	38
Работа № 5. Течеискание в вакуумных системах.....	50
Работа № 6. Типовые вакуумные системы.....	60
Работа № 7. Определение быстроты откачки насосов и проводимости элементов вакуумных систем методом постоянного объема.....	68
Работа № 8. Определение быстроты откачки вакуумных насосов методом постоянного давления.....	77