

Федеральное агентство по образованию

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

К.В. СОЛДАТОВА

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРОТЫ ОТКАЧКИ
ПЛАСТНИЧАТО-РОТОРНОГО И
КРИОАДСОРБЦИОННОГО НАСОСОВ**

Методические указания к лабораторной работе

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2011

УДК 621.515 (075.8)

ББК 31.76я73

Г 156

Определение быстроты откачки пластинчато-роторного и криоадсорбционного насосов.: Метод. Указания к лабораторной работе./ Солдатова К.В. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 24 с.

В методических указаниях к лабораторной работе рассматривается принцип действия пластинчато-роторного и криоадсорбционного насосов, области применения и особенности откачки. Обучающиеся получают сведения о методике проведения лабораторной работы в ходе, которой ставится задача определения быстроты откачки газа двух видов насосов.

Методические указания предназначены для проведения лабораторных работ у студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140500 - «Энергомашиностроение», по специальности 150801 - «Вакуумная и компрессорная техника физических установок».

Печатается по решению редакционно-издательского Совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

© К.В. Солдатова, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 4 |
| 1. Цели проведения лабораторной работы | 6 |
| 2. Принцип действия пластинчато-роторного насоса | 6 |
| 3. Принцип действия криодсорбционного насоса | 9 |
| 4. Схема экспериментальной установки | 12 |
| 5. Порядок подготовки к проведению работы | 15 |
| 6. Измеряемые параметры | 16 |
| 7. Методика проведения работы | 17 |
| 8. Обработка результатов | 17 |
| 9. Содержание отчета | 20 |
| 10. Требования безопасности и правила поведения при проведении лабораторной работы | 20 |
| Библиографический список | 23 |

ВВЕДЕНИЕ

Вакуумный насос — устройство, служащее для удаления (откачки) газов или паров до определённого уровня давления (технического вакуума).

Насосы являются одной из важнейших отраслей промышленности и области применения их весьма широки. В рамках данной лабораторной работы будут рассмотрены два вида насосов: пластинчато-роторные вакуумные и криоадсорбционные вакуумные насосы.

Пластинчато-роторные вакуумные насосы (ПРВН) используют для откачивания воздуха и неагрессивных газов в металлургии, химии и нефтехимии, строительной технике, сельском хозяйстве, на транспорте, в установках для транспортирования сыпучих материалов, сушки бетонных покрытий, в доильных установках, в вакуумных системах общего назначения [3].

ПРВН отличаются простотой конструкции и обслуживания, быстроходностью, возможностью непосредственного соединения с двигателем, хорошей уравновешенностью.

Недостатки этих насосов состоят в относительно высоких внутренних перетеканиях газа и механических потерях.

ПРВН разделяют на насосы, работающие со смазочным материалом и без него. Для насосов, работающих со смазочным материалом в рабочей полости, пластины изготовляют из стали 85, текстолита, асботекстолита, стеклотекстолита. Для насосов, работающих без смазочного материала, из неметаллических самосмазывающихся материалов, графита, антифрикционной фторопластовой композиции и др. [4].

Насосы изготовляют в стационарном и в транспортном (переносном) исполнении. Быстрота действия насосов находится в пределах $0,0003 - 0,833 \text{ м}^3/\text{с}$. Корпуса насосов имеют водяное или воздушное охлаждение.

Криоадсорбционные насосы находят свое применение в горнодобывающей промышленности, строительной отрасли, деревообрабатывающей промышленности, керамическом производстве, перегонке нефти, медицине, металлургии, нефтегазовой промышленности, полиграфии, производстве продуктов питания и напитков, текстильной промышленности, электронике, электроэнергетике, химической промышленности и т.д. [5].

Криоадсорбционная откачка осуществляется за счет адсорбции газов на охлажденных поверхностях. Равновесное давление газов определяется изотермами адсорбции, которые устанавливают связь между количеством поглощенного газа и давлением при постоянной температуре. Криоадсорбционные насосы не имеют постоянной быстроты действия, поскольку коэффициент откачки зависит от степени покрытия поверхности. Физические процессы происходят на поверхности и зависят от свойств сорбента и сорбата. Быстрота адсорбционной откачки определяется процессом нестационарной диффузии газа в пористой структуре адсорбента. Диффузия идет как в газовой фазе, так и на поверхности пор. При этом энергия связи между молекулами адсорбированного газа и сорбента превышает энергию связи между молекулами газа.

В качестве адсорбента используются цеолиты, активированный древесный уголь, пористый никель, оксидная пленка алюминия и другие материалы.

Существуют модели криоадсорбционных насосов с непрерывной регенерацией части адсорбента. Регенерация происходит во время работы насоса и реализуется в адсорбционных насосах непрерывного действия, обеспечивающих постоянную быстроту действия независимо от продолжительности работы насоса.

1. ЦЕЛИ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Целями проведения настоящей лабораторной работы являются:

- изучение работы ротационно-пластинчатого насоса;
- изучение работы криоадсорбционного насоса;
- ознакомление с принципами вакуумной откачки;
- сравнение темпов откачки насосов.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПЛАСТИНЧАТО-РОТОРНОГО НАСОСА

В работе используется пластинчато-роторный вакуумный насос НВПР-16-066. Насос предназначен для откачки воздуха, химических, неагрессивных газов, паров и парогазовых смесей, предварительно очищенных от капельной влаги и механических загрязнений, в вакуумных установках во избежание загрязнения смазочного материала и ускорения изнашивания сопряженных деталей.

Процесс откачки основан на механическом всасывании и выталкивании газа вследствие периодического изменения объема рабочей камеры, образуемой цилиндром и движущимися частями насоса – ротором и пластинами.

Схема насоса представлена на рис. 1. Эксцентрично установленный ротор 4, вращается в направлении указанным стрелкой в цилиндре 3. В прорези ротора помещены пластины 6, которые пружинами 5 прижимаются к поверхности цилиндра. Полость, образованная цилиндром, ротором и торцевыми крышками, делится пластинами на плоскости А и Б. При вращении ротора объем полости А периодически увеличивается и в

нее поступает газ из откачиваемой системы. Объем полости Б периодически уменьшается, в ней происходит сжатие газа. Сжатый газ выбрасывается через клапан.

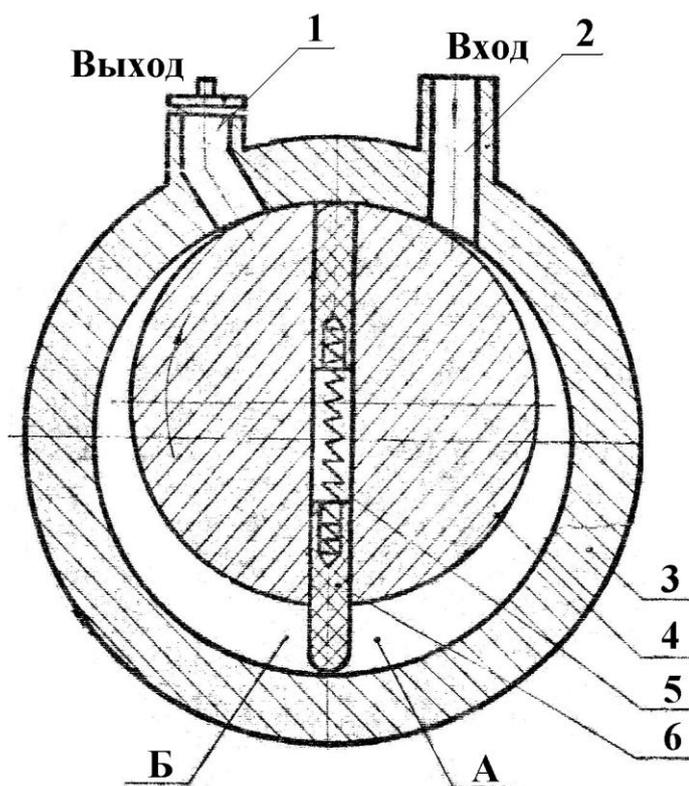


Рис. 1. Схема ротационно-пластинчатого насоса [4].

1 – входной патрубок, 2 – выходной патрубок, 3 – цилиндр, 4 – ротор,
5 – пружина, 6 – пластины, А, Б – рабочие полости

Насос представляет собой цельную конструкцию, смонтированную на основании с одной стороны которого крепится электродвигатель, с другой насос. Передача вращения от электродвигателя к насосу осуществляется с помощью муфты.

Этот насос относится к машинам с нерегулируемым отношением давлений, которое в значительной мере определяется расположением

кромки всасывающего и нагнетательного окон. Поэтому при изменении расчетного давления всасывания и нагнетания в момент открытия окон наблюдается несовпадение давлений в ячейке и патрубке. Это приводит к перетеканию газа и возникновению дополнительного шума при работе.

Действительный процесс сжатия газа в насосе вследствие наличия перетеканий газа, гидравлических потерь, теплообмена и обратного расширения отличается от теоретического. В результате малых дроссельных потерь на всасывании процессы всасывания действительного и теоретического насоса практически совпадают. Количество перетекающего газа зависит от разности давлений, режима течения, формы и размеров щели, наличия смазочного материала, коэффициента расхода, физических свойств рабочего тела, подвижности стенок щелей и др.

В начале процесса нагнетания газа площадь проходного сечения нагнетательного окна невелика и, следовательно, возникают заметные дроссельные потери на нагнетании.

В реальном насосе процесс обратного расширения (как и сжатия) не является термодинамическим процессом с постоянной массой газа. Во время обратного расширения преобладают интенсивные процессы перетекания газа через зазоры, причем в этот момент ячейка имеет относительно малый объем. Поэтому у реального насоса площадь индикаторной диаграммы всегда больше, чем у теоретического вакуумного насоса, в основном за счет внутренних перетеканий газа и гидравлических потерь.

Быстрота действия испытуемого насоса при входных давлениях $1,05 \times 10^5 - 133,3 \text{ Па}$ 16 л/с. Предельное остаточное давление насоса $1 \times 10^{-2} \text{ Па}$.

3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ КРИОАДСОРБЦИОННОГО НАСОСА

Принцип действия адсорбционных насосов основан на способности предварительно обезгаженных твердых пористых тел поглощать газы и пары в основном благодаря физической адсорбции, зависящей от температуры (сил Ван дер Вальса).

Криoadсорбционный насос предназначен для поддержания требуемого разрежения в форбаллоне при нормальной работе установки, если механический насос (ПРВН) отключен. Принцип действия насоса основан на поглощении и удержании газов и паров сорбентом, охлажденным до температуры жидкого азота.

Конструктивно насос состоит из корпуса изготовленного из нержавеющей стали, рис. 2. Внутри корпуса помещается стакан 2, внутри которого помещен другой стакан 3, изготовленный из меди, рис. 2. Между внутренней поверхностью стакана 3 и сеткой засыпан слой цеолита. Для уменьшения расхода азота служит экран, изготовленный из нержавеющей стали. В днище корпуса имеется устройство, выполняющее роль предохранительного клапана на случай, если давление внутри насоса превысит атмосферное.

Насос начинает работать через 15-20 минут после заливки в его стакан жидкого азота. Если вследствие длительной работы или пребывания на воздухе цеолит насытится, насос прекратит откачку и возникает необходимость в его генерации. Признаком насыщения цеолита является ухудшение вакуума в форбаллоне при откачке его сорбционным насосом. В данном случае проводят регенерацию цеолита.

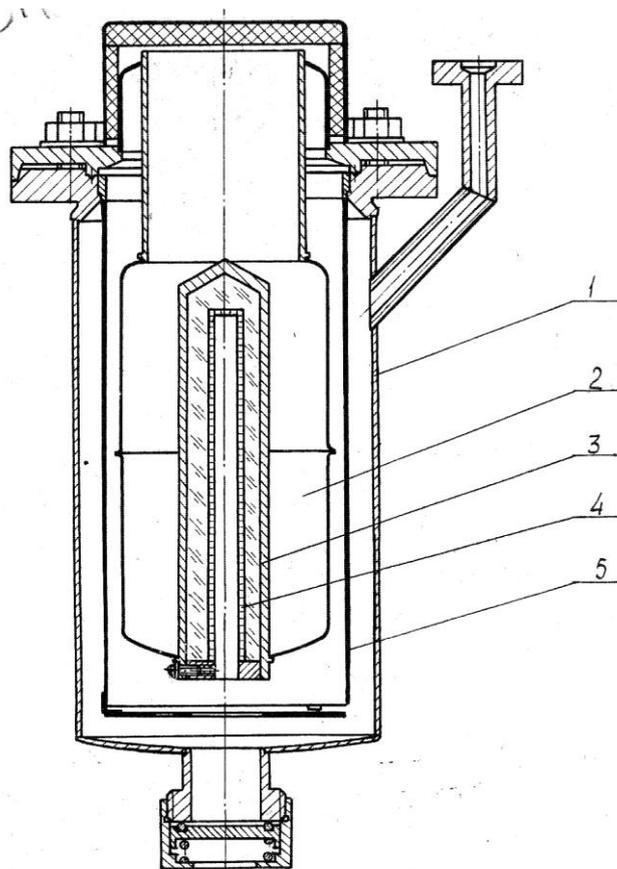


Рис. 2. Схема криоадсорбционного насоса [4].

1 – корпус, 2, 3 – стакан, 4 – сетка, 5 – экран

После получения давления не более 6 Па в насос можно снова залить азот и начать работу.

Основным достоинством криоадсорбционных насосов является полное отсутствие органических загрязнений откачиваемого сосуда. Недостатки насосов — это необходимость использования жидкого азота, периодическая регенерация и довольно значительное время охлаждения насоса.

В данном виде насосов применяют различные сорбенты. В настоящей лабораторной работе применяется азот.

Азот – это достаточно инертный при нормальных условиях двухатомный газ без цвета, вкуса и запаха (формула N_2). В жидком состоянии – это бесцветная, подвижная, как вода, жидкость, находящаяся при температуре $-195,8$ °С. При контакте с воздухом поглощает из него кислород.

Азот не токсичен, не пожаро- и взрывоопасен. Опасность при работе с этим газом возникает при разбавлении им воздуха в зоне нахождения людей и понижении объемной доли кислорода в воздухе, что приводит к кислородной недостаточности – удушью. В зонах, где возможны утечки азота, производится контроль оборудования и трубопроводов, а также контроль содержания кислорода в воздухе и работы вентиляции.

В качестве сорбента используется цеолит СаА-4В синтетический ТУ 33-101231-72. Именно цеолиты, представляющие собой алюмосиликаты щелочного или щелочноземельного металла природного или искусственного происхождения, получили наибольшее распространение. Пористую структуру и очень хорошие адсорбирующие свойства они приобретают после прокаливания; при этом кристаллическая решетка цеолита не разрушается, и после удаления кристаллизационной воды и цеолитах получают очень равномерные по размерам гонкие поры.

Недостатком цеолитов, как, впрочем, и других адсорбентов, является то, что они плохо поглощают инертные газы, а также практически полная их неэффективность по отношению к газам с очень низкой точкой кипения (H_2 , He , Ne).

С увеличением количества поглощенного газа при неизменной температуре адсорбента возрастает равновесное давление откачиваемого газа. Вместе с тем при одном и том же количестве поглощенного газа равновесное давление над поверхностью адсорбента тем меньше, чем ниже

его температура. Поэтому в вакуумных криoadсорбционных насосах адсорбент обычно охлаждается жидким азотом.

4. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для проведения лабораторной работы установлена в сухом вентилируемом помещении, оборудованном вытяжной и приточной вентиляцией. Помещение соответствует требованиям инструкции «санитарные правила проектирования, оборудования и эксплуатации и содержания производственных и лабораторных помещений». Помещение имеет заземляющий контур. Все стойки установки заземлены.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

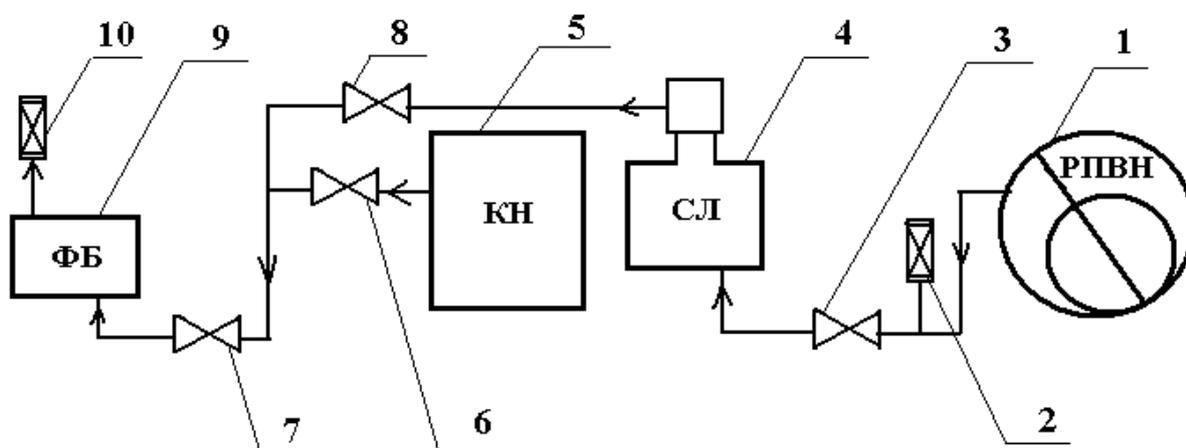


Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

1 – ротационно-пластинчатый насос, 2, 10 – манометры, 3, 6, 7, 8 – вентили,
4 – сорбционная ловушка, 5 – криoadсорбционный насос, 9 –
форвакуумный баллон

Принцип действия и назначение используемых в работе и представленных на схеме насосов подробно рассмотрен выше. Остановимся на рассмотрении остальных составляющих установки.

Сорбционная ловушка 4 предназначена для уменьшения обратного паромасляного потока из форвакуумного баллона в вакуумную систему. Основной частью ловушки является корпус, внутри которого находятся два слоя медной стружки и слой цеолита, рис. 4. Слои между собой разделены мелкой сеткой. Снаружи корпуса находятся рубашка водяного охлаждения и электронагреватель. Фланцем в верхней части корпуса ловушка соединяется через вентиль с вакуумной системой, а нижним фланцем с форнасосом.

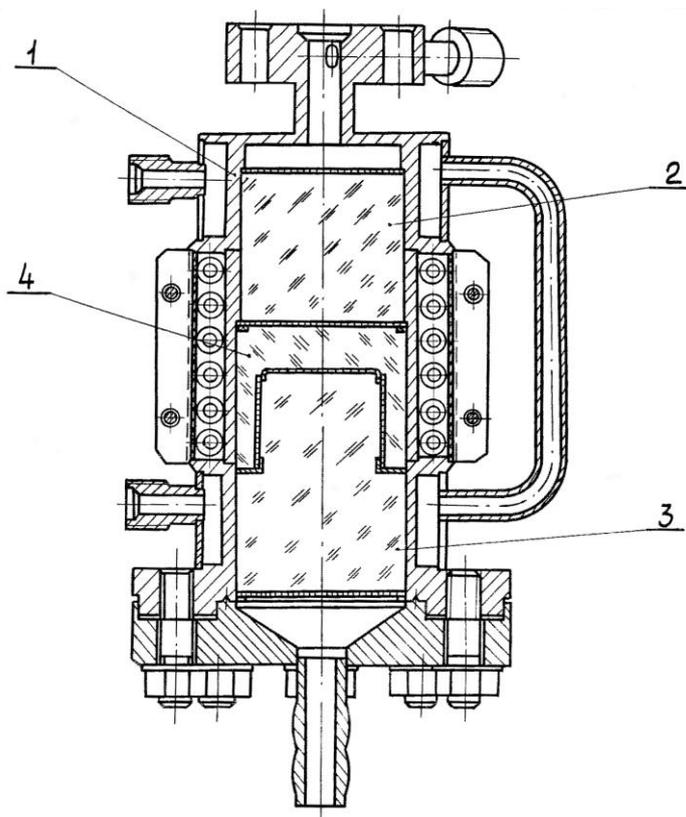


Рис. 4. Ловушка сорбционная [4].

1- корпус, 2, 3- слои медной стружки, 4- слой цеолита

Принцип действия ловушки основан на способности обезгаженного цеолита и в меньшей степени меди поглощать и удерживать газы и пары. Процесс поглощения идет до насыщения сорбента. Ловушка с насыщенным сорбентом фактически неработоспособна и требует регенерации. Признаком насыщенности сорбента в ловушке является ухудшение предельного вакуума в форбаллоне. Если цеолит находится при атмосферном давлении без нагрева более 0,5 часа, он насыщен и требует генерации. Регенерацию сорбента можно осуществить путем закрытия вентиля, на котором расположена ловушка и перекрыть подачу охлаждающей воды на нее.

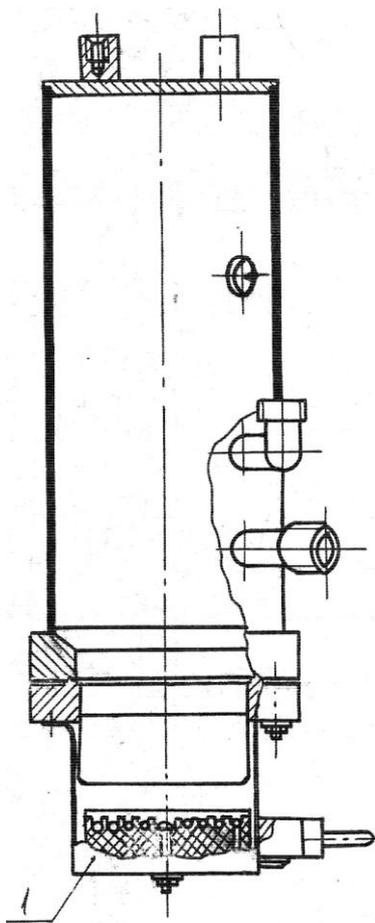


Рис. 5. Баллон форвакуумный. 1 – нагреватель [4].

Используемый в ловушке цеолит – представляет собой алюмосиликат, содержащий в своем составе SiO_2 и Al_2O_3 , окислы щелочных и щелочноземельных металлов, а также молекулы кристаллической воды. Поверхность цеолитов полярна и адсорбция во многом зависит от ориентационного эффекта взаимодействия.

Баллон форвакуумный является емкостью, обеспечивающей работы диффузионных насоса при выключенном форвакуумном насосе, рис. 5.

Емкость баллона 5 л. Баллон выполнен в виде цилиндра. На баллоне имеется штуцера и фланцы для вакуумной коммутации и штуцер под датчик давления. Для обезгаживания форбаллона применяется нагреватель.

5. ПОРЯДОК ПОДГОТОВКИ К ПРОВЕДЕНИЮ РАБОТЫ

Проведение лабораторной работы осуществляется в два этапа:

1. Беседа с опросом с применением плакатов, схем установки, знакомство с установкой, постановка задач исследования и режимов испытаний, знакомство с методикой эксперимента.

2. Подключение датчиков, приборов к измерительным приборам, подготовка стенда к пуску, пуск, выход на режим, снятие необходимых параметров, первичная обработка данных.

В случае неподготовленности студент не допускается к участию в лабораторной работе и выполняет ее в конце семестра.

При проведении работы каждый студент должен находиться на рабочем месте и принимать непосредственное участие в опыте.

Во время работы преподаватель контролирует правильность получаемых результатов измерения, контролирует работу студентов, следит за работой установки и соблюдением правил безопасности. Работа

считается проведенной студентами, только после проверки преподавателем полученных в ходе работы данных, сведенных воедино на одном листе.

Подготовка установки к работе начинается с вакуумирования ротационно-пластинчатого насоса. В течение 30-35 минут РПВН работает на холостом ходу. Время работы будет зависеть от состояния масла в насосе, поскольку необходимо очистить масло от воздуха. Одновременно с этим проводят регенерацию сорбционной ловушки. С помощью нагревателя входящего в состав ловушки происходит ее нагрев. В результате нагрева сорбент «выбрасывает» из себя весь объем воздуха, который находился в нем перед началом работы. Также с помощью нагрева до 450°C производится регенерация криоадсорбционного насоса. Цель регенерации – убирать из насоса все компоненты, которые осели на сорбенте.

6. ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В ходе работы необходимо произвести замеры создаваемого насосами давления в вакуумной камере (форвакуумном баллоне). При работе с газами и парами веществ равновесное парциальное давление компонента в источнике определяется соотношением между скоростью натекания и скоростью откачки. При работе пластинчато-роторного насоса замеры давления производятся через каждые 5 минут. При работе криоадсорбционного насоса замеры производятся через каждые 7-10 минут в зависимости от интенсивности откачки газа и насыщения сорбента.

Измерение давления производится с помощью милливольтметра.

7. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

В ходе работы необходимо откачать сорбционный форвакуумный баллон. Откачка начинается с атмосферного давления с использованием на первом этапе ротационно-пластинчатого насоса. Откачка продолжается до тех пор, пока давление в форбаллоне не достигнет 30 мВ. Измерение давления на данном этапе происходит с помощью милливольтметра. Приборы, фиксирующие изменение давления у ротационно-пластинчатого насоса располагаются на выходящем из него трубопроводе.

Достигнув давления 30 мВ перекрывается линия ротационно-пластинчатого насоса и включается в работу криoadсорбционный насос посредством заливки в него азота. Температура азота -195,8 °С. На стенках насоса, температура вследствие потерь, будет несколько выше, чем температура поступающего азота.

Откачка производится до давления 80 мВ. Замер давления при работе криoadсорбционного насоса производится непосредственно по датчику установленному в форвакуумном баллоне, так как датчик давления у криoadсорбционного насоса отсутствует.

8. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в ходе работы результаты измерения давления заносят в таблицу (таб. 1). Составляются две таблицы для ротационно-пластинчатого и криoadсорбционного насосов соответственно.

Обработка экспериментальных данных выполняется с помощью градуировочного графика, рис. 6. По данному графику полученные в ходе

проведения работы значения давлений переводятся из мВ в Па, после чего заносятся в таблицы соответствующие каждому из насосов (таб. 2).

Таблица 1

Оформление результатов эксперимента

| № режима | Время, t , мин | Давление, P , мВ |
|----------|------------------|--------------------|
| 1 | 0 | |
| 2 | 5 | |
| 3 | 10 | |
| ... | ... | |

Таблица 2

Оформление результатов расчета

| № режима | Время, t , мин | Давление, P , мВ | Давление, P , мм рт. ст. | Давление, P , Па |
|----------|------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
| 1 | 0 | | | |
| 2 | 5 | | | |
| 3 | 10 | | | |
| ... | ... | | | |

По результатам расчетов строят суммарные графики $P = f(t)$ для обоих насосов, рис. 7.

По результатам расчетов представленным в таблице 2 и графиках понижения давления в зависимости от времени откачки, необходимо сделать соответствующие выводы, отражающие основные особенности откачки пластинчато-роторного и криоадсорбционного насосов. Следует сравнить скорости откачки двух насосов между собой.

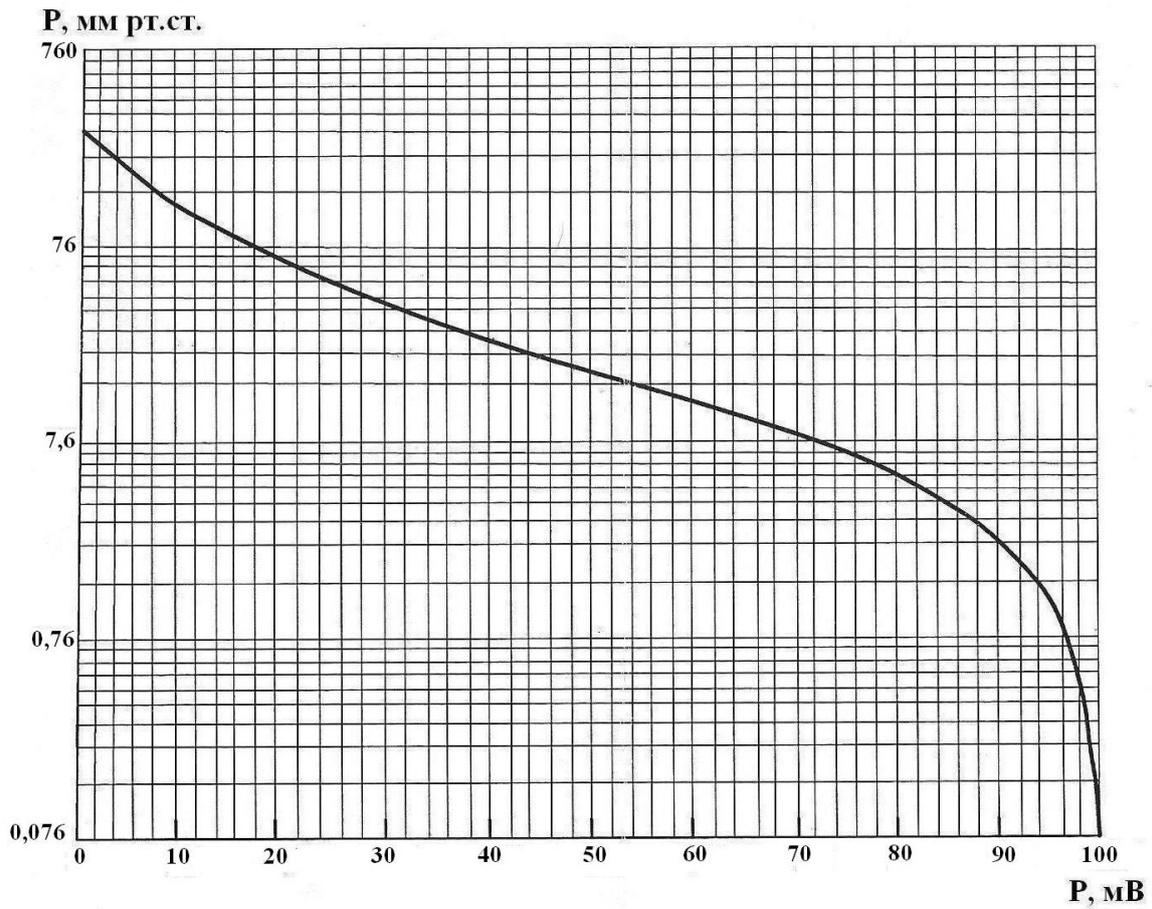


Рис. 6. Градуировочный график

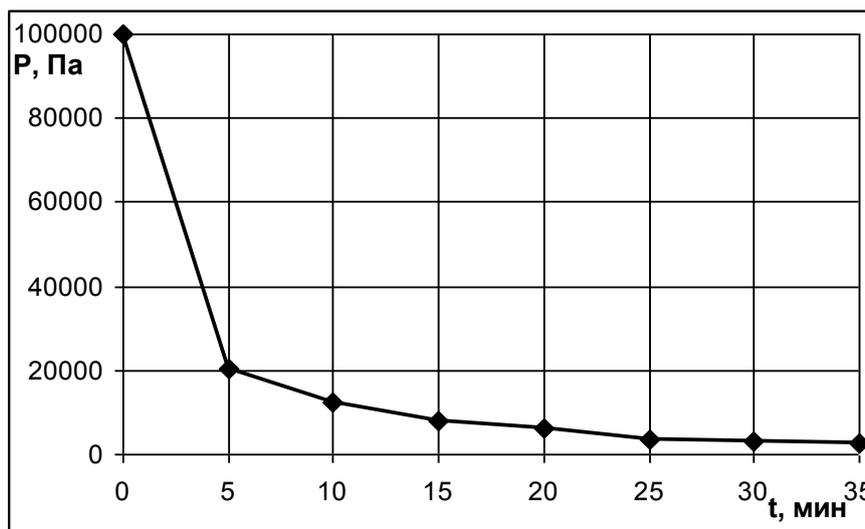


Рис. 7. График понижения давления в зависимости от времени откачки на примере ротационно-пластинчатого насоса

9. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Каждый студент предоставляет отдельный отчет. В отчете, в обязательном порядке, должно быть представлено:

1. Цель работы.
2. Описание принципа действия насосов (пластинчато-роторного и сорбционного).
3. Схема установки.
4. Методика проведения эксперимента.
5. Протоколы испытаний.
6. Подробный расчет давлений (не менее чем для 2-х режимов), т.е. пример обработки экспериментальных данных.
7. Графические зависимости, полученные по результатам расчетов для двух насосов.
8. Анализ полученных результатов (вывод).

10. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРАВИЛА ПОВЕДЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

К занятию в лаборатории допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и пожаробезопасности и расписавшиеся в соответствующем журнале. Инструктаж студентов проводит преподаватель.

Студенты должны быть извещены о дне, времени проведения и названия лабораторной работы не менее, чем за неделю. Перед началом работы студенты обязаны предоставить готовый отчет по предыдущей

работе. Разбивка студентов одной группы на подгруппы производится в соответствии с учебным планом (на 2 или 3 подгруппы)

Лабораторные занятия должны начинаться без опоздания и заканчиваться не позднее, чем за 15 минут, до начала следующего занятия. Студенты в лабораторию без преподавателя не допускаются.

Дверь в лабораторию во время занятий должна быть закрыта. Преподаватель во время занятий может разрешить работать в лаборатории другому преподавателю кафедры для выполнения работы.

Во время работы в лаборатории должен находиться хотя бы один преподаватель, который отвечает за порядок в лаборатории и работой студентов. Лабораторная работа проводится в специально отведённое в расписание время.

Преподаватель должен:

- требовать от студентов поддержания порядка и чистоты во время занятий;
- контролировать работу студентов на оборудовании во время занятия;
- требовать бережного отношения к учебной технике;
- допускать к занятию (зачёту) студентов одновременно не более одной учебной группы;
- не допускать посторонних, в том числе студентов других учебных групп.

При работе с жидким азотом следует соблюдать особую осторожность. Попадание жидкого азота в глаза и на открытые участки кожи может привести к тяжелым ожогам. При вдыхании чистого азота (как и другого инертного газа) пострадавший мгновенно теряет сознание и падает.

В случае обнаружении или возникновения неисправностей во время проведения лабораторной работы, могущих привести к возникновению аварии работа НЕМЕДЛЕННО прекращается.

Аварийная обстановка может возникнуть при резкой разгерметизации вентиля баллона, вентиля, штуцеров, манометров, шлангов или газопровода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пипко, А.И. Конструирование и расчет вакуумных систем. [Текст]. 3-е изд., перераб. и доп. — Москва: Энергия. 1979. — С. 504.
2. Розанов, Л.Н. Вакуумная техника. [Текст]. Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Высш. шк. 1990. — С. 320.
3. Розанов, Л.Н. Вакуумная техника: Конспект лекций. [Текст]. ЛПИ им. М.И.Калинина. — Ленинград. 1971.
4. Руководство по эксплуатации ЦФЗ. 394. 018 РЭ. Предприятия п/я В-2613. Масс-спектрометры МИ. [Текст]. — 1201. — 1977.
5. Фролов, Е.С. Вакуумные системы и их элементы. Справочник — атлас. Под ред. В.Д. Лубенца. [Текст]. — Москва: Машиностроение. 1968. — С. 191.
6. Шешин, Е. П. Вакуумные технологии. Учебное пособие. [Текст]. — Долгопрудный: Интеллект. 2009. — С. 501.

Солдатова Кристина Валерьевна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРОТЫ ОТКАЧКИ ПЛАСТНИЧАТО-
РОТОРНОГО И КРИОАДСОРБЦИОННОГО НАСОСОВ**

Методические указания к лабораторной работе № 1.

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3005 – учебная литература

Подписано в печать 01.06.11. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 24 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в Цифровом типографском центре Издательства Политехнического
университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Тел.: (812) 550-40-14

Тел./Факс: (812) 297-57-76