

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**В.И. Иванов, Е.В. Соколова**

**ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА**  
**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

**Учебно-методическое пособие**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2016**

УДК 621.521

**Иванов В.И., Соколова Е.В.** Вакуумная техника. Лабораторный практикум: Учеб. - метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 40 с.

Представлены лабораторные работы по основным разделам дисциплины «Вакуумная техника». Пособие содержит обзор теоретических вопросов, связанных с вакуумными приборами и оборудованием, а именно спецификой измерений вакуума в криогенных объектах, а также схемы и описание работы механических и пароструйных вакуумных насосов.

Пособие предназначено для работы студентов направлений бакалавриата 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика и 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения очной и заочной форм обучения по дисциплине «Вакуумная техника».

**Рецензент: доктор техн. наук, проф. О.Б. Цветков**

**Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 1 от 31.08.2016 г.**



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Иванов В.И., Соколова Е.В., 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ВАКУУМНЫЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ.....	5
1.1. Термопарные вакуумметры.....	5
1.2. Ионизационные вакуумметры.....	7
1.3. Специфика измерения вакуума в криогенных объектах....	9
1.4. Механические вакуумные насосы.....	12
1.5. Пароструйные вакуумные насосы.....	15
1.6. Проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения газа.....	19
2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	22
2.1. Лабораторная работа №1 Испытание механического вакуумного насоса.....	22
2.2. Лабораторная работа №2 Испытание диффузионного вакуумного насоса.....	26
2.3. Лабораторная работа №3 Измерение проводимости трубопровода.....	31
2.4. Лабораторная работа №4 Температурная транспирация.....	35
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	39

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время вакуум широко используется в самых разнообразных отраслях промышленности и науки. Не является исключением и криогенные системы, для которых вакуумное оборудование стало неотъемлемой составной частью.

В криогенике вакуум используется, прежде всего, для целей тепловой изоляции криогенного оборудования: резервуаров для хранения и транспортирования жидких криопродуктов, криогенных трубопроводов, блоков ожижения водорода, гелия и т.д. Вакуум необходим также для регенерации адсорбентов в блоках очистки криогенных газов, для снижения температуры кипения криогенных жидкостей и их отвердения или получения шугообразного состояния и во многих других приложениях в сфере криогеники.

Практическое применение вакуумных технологий невозможно без приобретения навыков по эксплуатации вакуумного оборудования и приборов. Проведение лабораторных работ по курсу «Вакуумная техника» будет несомненно способствовать более глубокому пониманию процессов, протекающих в вакуумных насосах различных принципов действия. Позволит понять возможности и ограничения вакуумного оборудования и приборов. Получить навык эксплуатации вакуумных систем.

Пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлениям 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика и 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения для очной и заочной форм обучения по дисциплине «Вакуумная техника».

# 1. ВАКУУМНЫЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

## 1.1. Термопарные вакуумметры

Термопарный вакуумметр (рис. 1.1) включает в себя преобразователь монотрический термопарный (ПМТ) и вторичный прибор. Преобразователь (лампа) представляет собой стеклянную или металлическую колбу 1, внутри которой на двух вводах закреплена платиновая или никелевая нить накала 2, а на двух других вводах крепится термопара 3, изготовленная из хромель-копеля или хромель-алюмеля. Термопара предназначена для измерения температуры нити накала. При постоянном токе температура нити меняется с изменением давления. Снижение давления ухудшает теплосъём с нити газом, что компенсируется повышением её температуры и, соответственно, наоборот. Измеряя термопарой температуру нити (измеряя ЭДС), можно судить о величине давления.

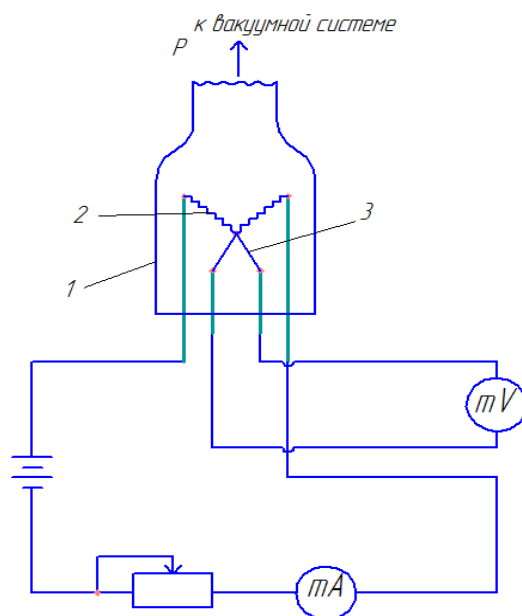


Рис. 1.1. Схема термопарного вакуумметра:  
1 – колба; 2 – нить накала; 3 – термопара

Термопарные вакуумметры позволяют измерять давления в диапазоне от  $10^{-1}$  до  $10^2$  Па с погрешностью  $\pm 15$  %. Нижний предел измеряемого давления ограничивается тем, что при малых давлениях достигается состояние, когда отвод теплоты от нити накала газом становится гораздо меньше отвода излучением и по

конструктивным элементам вводов  $Q_{\Gamma} \ll Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}}$ . Температура нити при этом постоянная, не зависит от давления и определяется только потерями теплоты за счёт  $Q_{\text{л}}$  и  $Q_{\text{к}}$ . Верхний предел измеряемого давления определяется, во-первых, тем, что в плотном газе теплопроводность перестаёт зависеть от давления. Во-вторых, из-за интенсивного отвода теплоты от нити газом снижается разность температур  $T_{\text{н}} - T_{\text{с}}$ , что приводит к потере чувствительности прибора. Увеличив ток накала, можно измерять давления до 100 Па, но при этом датчик должен располагаться вертикально цоколем вверх.

Показания тепловых вакуумметров зависят от рода газа. Обычно датчики градуируются по азоту (рис. 1.2). При измерении давления других газов, имеющих иную теплопроводность, это следует учитывать путём поправочного коэффициента относительной чувствительности (табл. 1.1):

$$p_{\Gamma} = C \cdot p_{\text{а}}, \quad (1.1)$$

где  $p_{\Gamma}$  – давление газа в объекте;

$p_{\text{а}}$  – давление, измеренное датчиком, отградуированным по азоту;

$C$  – коэффициент относительной чувствительности теплового вакуумметра [1].

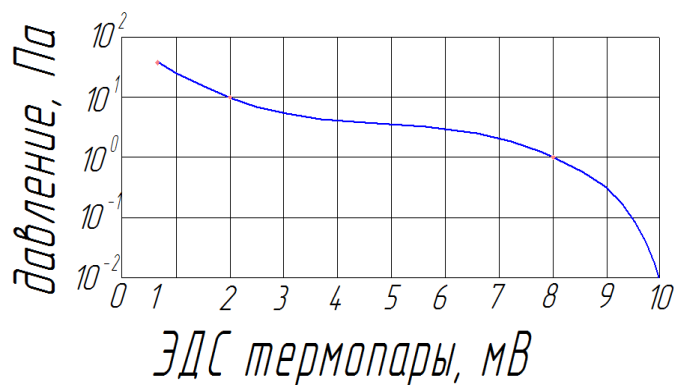


Рис 1.2. Образец градуировочной кривой термопарного вакуумметра

Таблица 1.1

**Коэффициенты относительной чувствительности тепловых вакуумметрических преобразователей по различным газам**

Газ	Воздух	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	He	Ne	Ar	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
$C$	1,0	1,0	0,67	1,12	1,31	1,65	0,97	0,61

## 1.2. Ионизационные вакуумметры

Принцип действия ионизационных вакуумметров основан на зависимости тока положительных ионов, образующихся при ионизации молекул разреженного газа, от измеряемого давления. По способу ионизации вакуумметры делятся на три типа:

- электронные с ударной ионизацией, в которых ускоренные электрическим полем свободные электроны выбивают с внешних орбит молекул электроны, превращая нейтральные молекулы в положительные ионы;

- радиоизотопные, в которых для ионизации газа применяют излучение радиоактивных материалов;

- магнитные электроразрядные с холодными электродами и самостоятельным разрядом в магнитном поле.

Чувствительность ионизационных вакуумметров всех трёх типов зависит от рода газа, давление которого измеряется.

### Электронный ионизационный вакуумметр

Типовой преобразователь давления (лампа ПМИ-2), показанный на рис. 1.3, получил широкое распространение для измерения давлений от  $10^{-1}$  до  $10^{-5}$  Па.

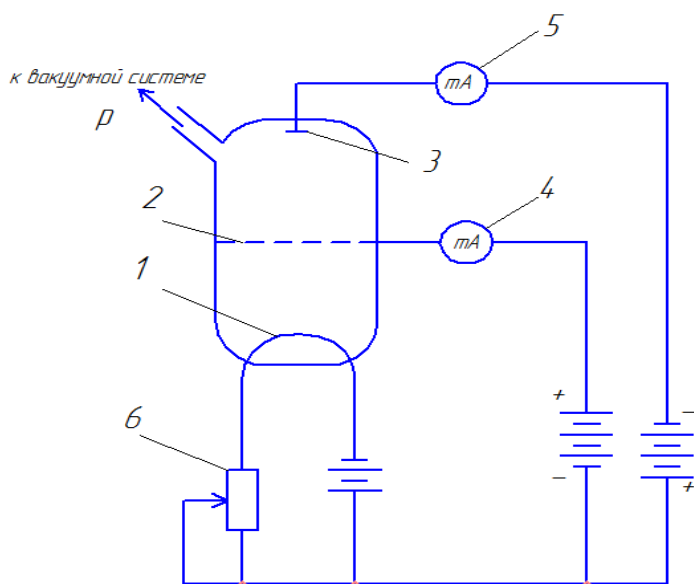


Рис. 1.3. Электронный ионизационный вакуумметр:

1 – катод; 2 – анодная сетка; 3 – коллектор ионов;

4 – измеритель сеточного тока  $I_c$ ; 5 – измеритель ионного тока  $I_{и}$ ; 6 – реостат

Катод прямого накала  $I$  в форме шпильки из вольфрамовой проволоки служит источником электронов. Испускаемые катодом электроны ускоряются под действием электрического поля, создаваемого положительно заряженной сеткой  $2$ , выполненной в виде цилиндрической спирали. Ввиду большого шага витков сетки, значительная часть электронов пролетает за сетку. В пространстве между сеткой и коллектором ионов  $3$  происходит, в основном, ионизация газа электронами. Отталкиваемые полем отрицательно заряженного коллектора электроны вновь возвращаются к сетке. В результате вокруг анодной сетки непрерывно колеблются электроны, а попав в витки, создают в её цепи сеточный ток  $I_c$ .

Образующиеся положительные ионы притягиваются к отрицательно заряженному коллектору, воспринимают от него недостающий электрон и вновь становятся нейтральными молекулами. В результате отбора с коллектора электронов в его цепи возникает ионный ток  $I_n$ , который служит мерой измеряемой концентрации молекул  $n$  (давления газа). Поскольку величина ионного тока зависит не только от концентрации молекул газа, но и от количества электронов, участвующих в процессе ионизации, то  $I_n = f(n, I_c)$ . Для однозначной зависимости  $I_n$  от  $n$  сеточный ток фиксируют ( $I_c = \text{const}$ ).

Электронные ионизационные датчики обладают откачивающим действием. Некоторое количество газа хемосорбирует на горячем катоде (особенно кислород), а другая часть откачивается в результате внедрения ионов в электроды датчика. Например, для лампы ПМИ-2 быстрота ионной откачки составляет примерно  $0,01$  л/с.

Верхний предел измеряемого давления типовым датчиком составляет примерно  $10^{-1}$  Па. При более высоких давлениях есть опасность окисления (сгорания) катода. Кроме того, из-за малой длины свободного пробега электронов в плотном газе они не успевают ускориться и приобрести достаточную энергию для ионизации молекул.

Нижний предел вакуумметра обусловлен фоновой составляющей тока коллектора, не зависящей от давления. Электроны при торможении на сетке дают мягкое рентгеновское излучение, которое, попадая на коллектор, вызывает фотоэмиссию (вылет с него электронов). При давлении газа менее  $10^{-5}$  Па ток фотоэмиссии  $I_\phi$  может оказаться доминирующим по сравнению с ионным током  $I_\phi \gg I_n$



и тогда показания прибора перестают зависеть от давления газа. Для измерения сверхвысокого вакуума применяют датчики с обращенным расположением электродов.

Поскольку электронный ионизационный вакуумметр является прибором косвенного измерения давления газа, то он нуждается в градуировке. Градуировка производится путем сравнения показаний прибора с показаниями компрессионного эталонного вакуумметра.

Датчики электронного ионизационного вакуумметра градуируются по азоту (воздуху). Для измерения давления других газов требуется градуировка по конкретному газу или, для технических измерений, пересчет по формуле (1.1). Коэффициенты относительной чувствительности для ряда газов [2] приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

**Коэффициенты относительной чувствительности электронных ионизационных вакуумметров**

Газ	N <sub>2</sub>	Воздух	H <sub>2</sub>	He	Ar	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
C	1,0	1,0	2,18	5,3	0,73	1,15	0,62	0,91

### 1.3. Специфика измерения вакуума в криогенных объектах

Явление тепловой транспирации имеет важное значение при измерении давления в криовакуумных системах, когда манометр, находящийся при комнатной температуре, соединен с исследуемым объемом узким каналом, а сам объем находится при температуре, отличной от комнатной. На рис. 1.4 показана типичная для криовакуумной системы ситуация.

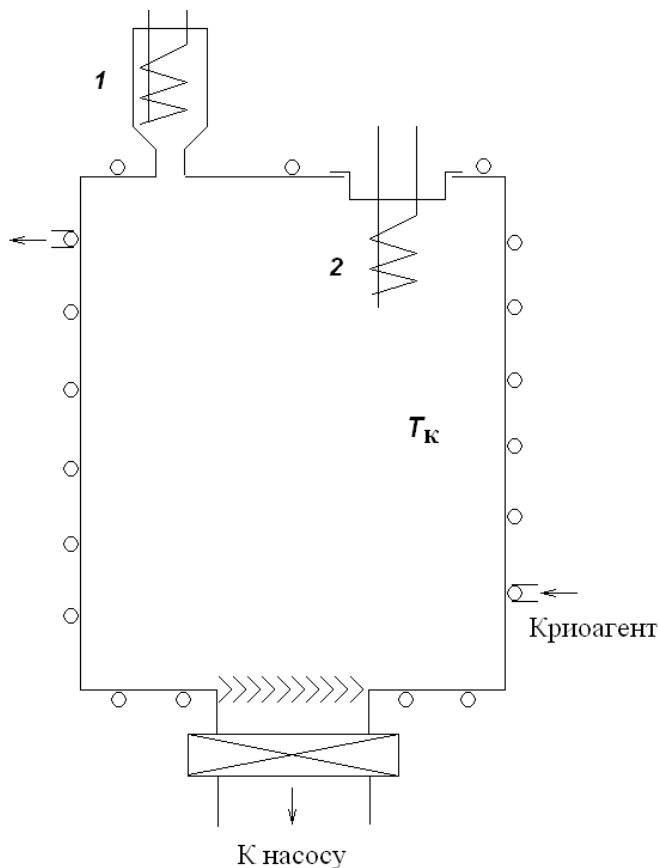


Рис.1.4. К вопросу измерения вакуума в криогенных системах:  
 1 – внешний датчик; 2 – встроенный датчик

В камере с охлажденными стенками вакуум измеряется с помощью внешнего датчика 1 и встроенного открытого датчика 2. Объемом колбы датчика 1 можно пренебречь. Когда стенки камеры не охлаждаются и температура колбы датчика 1  $T_1$  равна температуре стенок камеры  $T_k$ , концентрация молекул имеет равномерное распределение по всей системе  $n_1 = n_k$ . Если бы не было сорбционно-десорбционных явлений, то давления в колбе датчика и в камере были бы равны  $p_1 = p_k$ , поскольку  $p_1 = n_1 \cdot k \cdot T_1$ , а  $p_k = n_k \cdot k \cdot T_k$ . Это означает, что показания внешнего и встроенного датчиков должны совпадать.

Как изменится концентрация молекул и давление в колбе датчика 1 и в камере, если стенки камеры охладить до температуры, например,  $T'_k = 77$  К, а температуру стенок колбы датчика оставить прежней, пусть  $T_1 = 300$  К? В соответствии с явлением тепловой транспирации часть молекул газа перейдет из колбы 1 в камеру, но поскольку объем последней значительно превышает объем колбы, то

концентрация молекул в камере практически не изменится  $n'_k = n_k$ . В колбе же датчика концентрация будет равна:

$$n'_1 = n_k \cdot \sqrt{\frac{T'_k}{T_1}} = n_k \cdot \sqrt{\frac{77}{300}} \approx 0,5 \cdot n_k = 0,5 \cdot n_1.$$

Давление газа в колбе будет:

$$p'_1 = n'_1 \cdot k \cdot T_1 = 0,5 \cdot n_1 \cdot k \cdot T_1 = 0,5 \cdot p_1.$$

Давление в камере:

$$p'_k = n'_k \cdot k \cdot T'_k = n_k \cdot k \cdot T_k \cdot \frac{T'_k}{T_k} = n_k \cdot k \cdot T_k \cdot \frac{77}{300} \approx 0,25 \cdot p_k.$$

Следовательно, при охлаждении стенок камеры жидким азотом до температуры 77 К концентрация и давление газа в колбе датчика снизятся в два раза, в то время как концентрация молекул газа в камере останется неизменной, а давление снизится в 4 раза.

Таким образом, если датчики измеряют концентрацию молекул (ионизационные манометры), то внешний прибор снизит свои показания вдвое, а показания встроенного не изменятся. Чтобы по внешнему манометру определить истинную концентрацию молекул в камере, необходимо его показания удвоить, а если требуется найти давление в камере, то его показания надо уменьшить в два раза. Встроенный датчик показывает истинную концентрацию, а давление завышает в 4 раза.

Приведенные рассуждения справедливы для случая, когда колба датчика и камера сообщаются друг с другом трубкой, диаметр которой  $d$  мал по сравнению со средней длиной свободного пути молекул  $l$ . Если же  $l$  гораздо меньше  $d$ , так что столкновения между молекулами происходят значительно чаще, чем столкновения молекул со стенками, то условием равновесия является равенство давлений в колбе и в камере независимо от их температуры  $p_1 = p_k$ .

Следствием этого будет соотношение  $\frac{n_1}{n_k} = \frac{T_k}{T_1}$ .

Таким образом, существует интервал давлений, в котором отношение давлений  $\frac{p_k}{p_1}$  меняется от 1 до  $\sqrt{\frac{T_k}{T_1}}$ . Чем меньше диаметр

трубки, соединяющей датчик с камерой, тем выше давление, при котором справедливо соотношение  $\frac{p_k}{p_1} = \sqrt{\frac{T_k}{T_1}}$ .

#### 1.4. Механические вакуумные насосы

##### Ротационные вакуумные насосы с масляным уплотнением

Наиболее распространенными насосами для получения низкого и среднего вакуума ( $10^5 - 10^{-1}$ ) Па являются ротационные насосы с масляным уплотнением. Они относятся к насосам объемного действия поскольку работают за счет периодического изменения объема рабочей камеры.

Пластинчато-роторный насос представлен на рис. 1.5. В цилиндрической полости статора 1 вращается эксцентрично расположенный ротор 2, в прорези которого свободно скользят пластины 6 и 7, распираемые пружиной 8. При вращении ротора центробежные силы также прижимают пластины к внутренней поверхности статора и они скользят по ней.

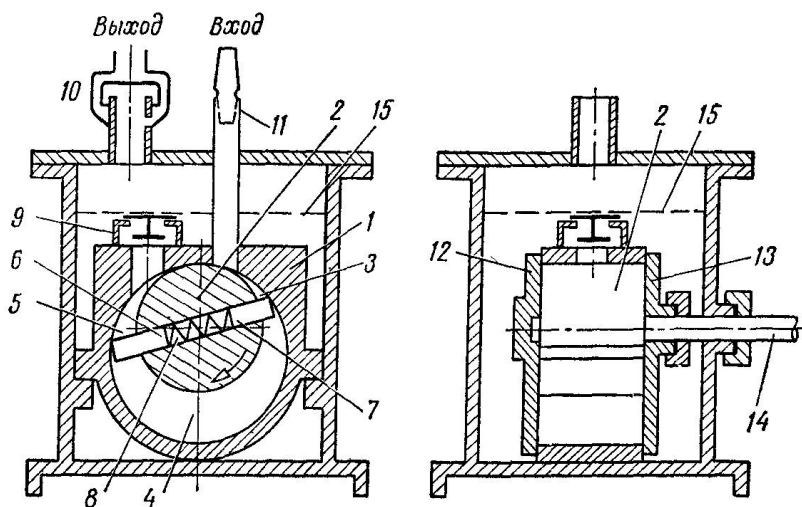


Рис. 1.5. Масляный ротационный насос с золотниками в роторе:  
 1 – статор; 2 – ротор; 3, 4, 5 – части камеры; 6, 7 – золотники; 8 – пружина;  
 9 – обратный клапан; 10 – маслоуловитель; 11 – фильтр;  
 12, 13 – боковые крышки; 14 – ось; 15 – уровень масла

Пластины и ротор делят полость статора на области 3, 4 и 5. Область 3 соединяется с впускным патрубком, имеющим сетчатый фильтр 11. Область 5 связана с выпускным клапаном 9, а область 4 ограничена двумя пластинами.

Область 3 при вращении ротора увеличивает свой объем, и в нее поступает газ из впускного патрубка, связанного с откачиваемым объектом. Газ в области 4 перемещается от входа к выходу. Область 5 уменьшается в объеме, газ в ней сжимается и выталкивается через клапан 9 во внешний корпус насоса, заполненный вакуумным маслом. Далее газ проходит маслоуловитель 10 и выбрасывается в атмосферу. Таким образом, в насосе осуществляется перенос газа из откачиваемого объекта в атмосферу.

Масло, находящееся в корпусе насоса, проникает по отверстию в статор, смазывает трущиеся детали, уплотняет зазоры в роторном механизме, благодаря чему уменьшается обратное перетекание газа с выходной области 5 во входную область 3. Избыток масла выталкивается вслед за газом через клапан 9 вновь в масляную ванну корпуса.

В пластинчато-статорном насосе (рис. 1.6) цилиндрический ротор 1 расположен с некоторым эксцентриситетом в цилиндре статора 3.

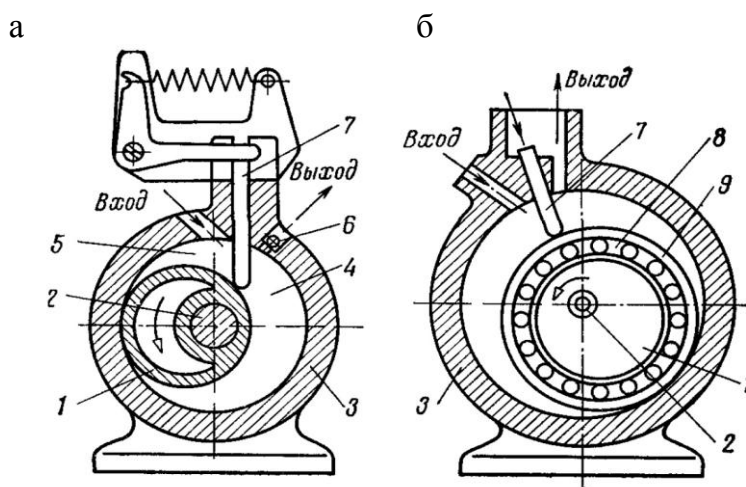


Рис. 1.6. Ротационный масляный насос с золотником в статоре:  
 а – золотник скользит по эксцентрической поверхности ротора;  
 б – золотник упирается в цилиндрическое кольцо,  
 катящееся по эксцентрику ротора:  
 1 – эксцентрический ротор; 2 – вал; 3 – статор; 4, 5 – области насосной камеры;  
 6 – шариковый обратный клапан; 7 – пластина;  
 8 – обойма; 9 – цилиндр эксцентрика

При вращении вала 2 ротор постоянно соприкасается с поверхностью статора. Пластина 7, совершая возвратно-поступательные движение в щели статора, постоянно прижимается пружиной к поверхности ротора. Таким образом, свободная полость статора делится пластиной на две области 4 и 5. При вращении ротора газ из откачиваемого объекта поступает через входной патрубок в увеличивающуюся в объеме полость 5. В это же время газ в полости 4 сжимается и выталкивается через клапан б в атмосферу. За два оборота ротора порция газа, поступившая из откачиваемого объекта, перемещается в насосе от впускного патрубка к выпускному клапану, сжимается в полости 4 и выталкивается из насоса.

На рис. 1.7 схематично изображен плунжерный (золотниковый) насос. В цилиндрическом корпусе вращается эксцентричный ротор 2. Шарнирный золотник 1 (прямоугольной формы) жестко соединен с цилиндром ротора. Золотник имеет канал 3, через который газ из откачиваемого объекта поступает в рабочую камеру. При повороте плоской части золотника шарнир свободно поворачивается в гнезде корпуса насоса.

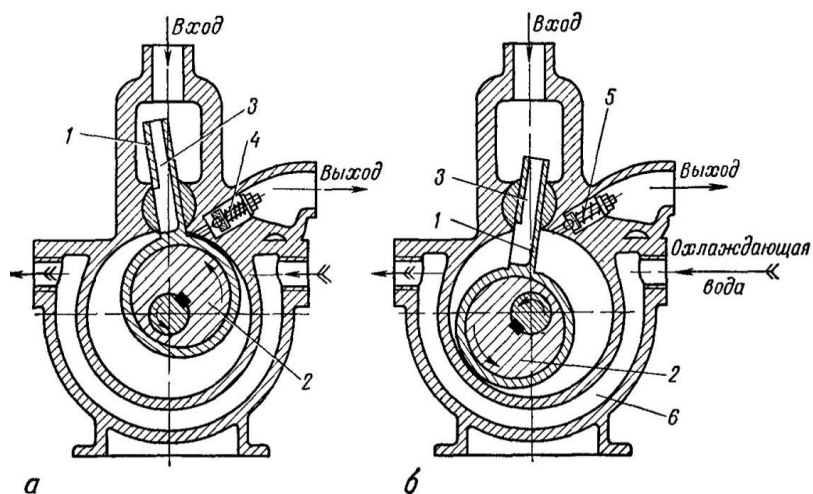


Рис. 1.7. Эксцентриковый ротационный насос с шарнирным золотником Кинни:

а – завершение периода удаления и начало периода наполнения;

б – промежуточное положение:

1 – золотник; 2 – ротор; 3 – канал в золотнике;

4 – выходной обратный клапан открыт;

5 – выходной обратный клапан закрыт;

6 – вода, охлаждающая статор насоса

В определенные моменты времени объем левой полости увеличивается и заполняется откачиваемым газом. В течение следующего оборота замкнутый объем, заполненный газом, уменьшается, газ сжимается и выталкивается через клапан 4 в атмосферу.

В данном насосе реализуется бесконтактное скольжение ротора по поверхности цилиндра корпуса, что определяет его малый износ и надежность. Вакуумное масло, заполняя зазоры между движущимися частями, обеспечивает герметичность полостей насоса.

Рассмотренные выше ротационные вакуумные насосы с масляным уплотнением производят откачку объектов начиная с атмосферного давления и способны, сжимая откачиваемый газ, вытеснять его в атмосферу. Эти насосы используются как самостоятельные средства создания вакуума до  $10^{-1}$  Па, так и в качестве вспомогательных (форвакуумных) при совместной работе с высоковакуумными насосами.

Быстрота действия насосов с масляным уплотнением практически не зависит от рода откачиваемого газа и может составлять до  $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$  для пластинчато-статорных и пластинчато-роторных насосов и до  $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$  для золотниковых.

### **1.5. Пароструйные вакуумные насосы**

Насосы, в которых откачивающим рабочим телом является струя пара, можно разделить на эжекторные (бустерные) и диффузионные.

В эжекторных насосах откачиваемый газ захватывается сверхзвуковой струей пара, причем часть молекул откачиваемого газа получает импульс скорости в направлении откачивания в результате столкновения с паровой струей, а часть поглощается этой струей, так как внутри нее парциальное давление газа ниже, чем в окружающем струю откачиваемом пространстве. Различают эжекторные насосы, работающие на водяном пару (паровые), на парах ртути (ртутные), а также на парах масла (масляные). Для создания высокого вакуума используются лишь ртутные и масляные эжекторы. Эжекторные насосы часто используются не самостоятельно, а в качестве ступени диффузионного насоса.

В масляных и ртутных эжекторных насосах струя пара рабочего тела генерируется в испарителе. Она обладает большой

плотностью и высокой скоростью, а это позволяет производить откачку при сравнительно высоком давлении. Такие насосы особенно удобно применять в области вакуума порядка 0,1 Па и выше, где скорость откачки ротационных масляных насосов уже недостаточна.

В противоположность эжекторным насосам, работающим при сравнительно высоких выходных давлениях, диффузионные насосы требуют предварительного вакуума на выходе порядка  $10^1$ – $10^{-1}$  Па. На рис 1.8. представлена схема диффузионного насоса.

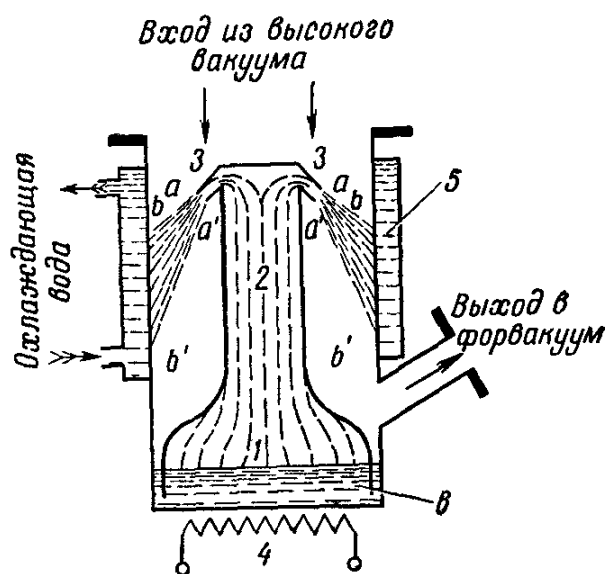


Рис. 1.8. Диффузионный насос (масляный или ртутный):  
 1 – резервуар рабочего тела (испаритель); 2 – паропровод; 3 – сопло;  
 4 – подогреватель; 5 – конденсатор; б – масло (ртуть);  
 ab – откачивающая поверхность паровой струи (“диафрагма”)

В резервуаре 1 с рабочим телом (маслом, ртутью), подогреваемом электрическим подогревателем 4, генерируется пар, который по трубе 2 попадает в тарельчатое сопло 3. В сопле происходит преобразование энергии давления пара в кинетическую энергию. Одновременно струя пара приобретает форму кольцевого усеченного конуса aa' – bb'. Корпус насоса на участке bb' (конденсатор) охлаждается водой. Пар на этой поверхности конденсируется, и жидкость стекает по стенке в резервуар, где снова кипит. Таким образом, между соплом и конденсатором насоса постоянно существует поток



пара рабочего тела. Молекулы откачиваемого газа со стороны входа в насос попадают на коническую поверхность ab струи, называемую диафрагмой, и диффундируют внутрь струи. При этом они сталкиваются с молекулами пара и получают импульс скорости в направлении движения струи рабочего тела. Концентрация газа в расширившейся после выхода из сопла струе пара очень мала, благодаря чему молекулы газа легко диффундируют внутрь струи. После конденсации паров на стенках захваченный паром газ оказывается в выходном пространстве насоса, где давление предварительного вакуума (порядка  $10^2$ – $10^0$  Па). Отсюда газ удаляется в атмосферу форвакуумным насосом.

Диффузионные насосы, подобно ротационным, могут включаться последовательно, т.е. выход одного насоса соединяется с входом другого. Это позволяет повысить предельный вакуум или использовать насосы с менее жесткими требованиями в отношении форвакуума. Многоступенчатый диффузионный насос является своего рода реализацией последовательного соединения нескольких диффузионных насосов в общем корпусе. В таком насосе обычно применяется общий испаритель (рис. 1.9). Скорость истечения струи пара зависит от конструкции сопла, мощности подогревателя и температуры кипения рабочей жидкости в резервуаре, а также от распределения температур по длине паропровода и сопла. Пример такого распределения показан на рис. 1.9.

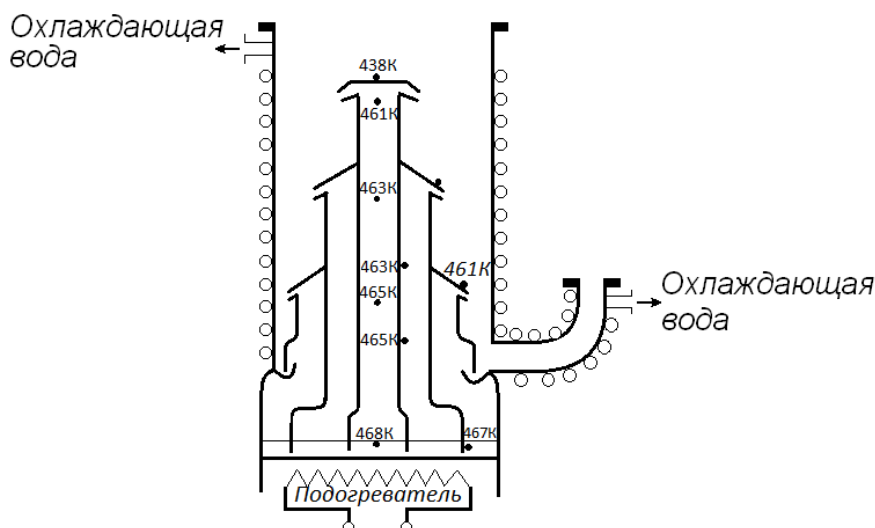


Рис. 1.9. Диффузионный вакуумный насос с фракционированием масла

Во время работы диффузионного насоса из-за высокой температуры и соприкосновения масла с металлами и газами происходит деструкция и частичное разложение его макромолекул. Вследствие этого в насосе образуются летучие фракции масла, имеющие более высокое давление паров, что ухудшает предельный вакуум. Во избежание слишком частой замены или дистилляции масла процесс отделения более летучих фракций можно проводить в самом насосе. Для этого в насосах с фракционированием масла каждое сопло имеет отдельный паропровод. Причем сопло последней ступени, создающей предельный вакуум, масло для которой должно иметь как можно меньше летучих компонентов, питается из центральной части испарителя. Это связано с тем, что сконденсировавшееся масло проходит до этой части испарителя самый длинный путь: от конденсатора через все лабиринты паропроводов, погруженных в резервуар. В результате этого во внешние паропроводы, питающие сопла последних ступеней, попадают более легкие фракции масла с более высоким давлением насыщенных паров. Предельное давление в насосе с фракционированием масла на 1–2 порядка ниже, чем в обычном диффузионном насосе, и может составлять  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  Па.

Быстрота действия диффузионного насоса в значительной мере определяется площадью входного отверстия и родом откачиваемого газа. Её можно определить по формуле

$$S_{\text{н}} = F\eta\sqrt{\frac{R_0T}{2\pi M}}\left(1 - \frac{p_{\text{пр}}}{p}\right), \quad (1.2)$$

где  $F$  – площадь кольцевого входного отверстия насоса;

$\eta$  – вакуум-фактор (коэффициент захвата);

$R_0 = 8314$  Дж/(кмоль\*К);

$T, p, M$  – соответственно температура, давление и молекулярная масса откачиваемого газа;

$p_{\text{пр}}$  – предельное остаточное давление, создаваемое насосом без газовой нагрузки.

Средняя величина вакуум-фактора у современных диффузионных насосов примерно равна 0,3–0,4.

Основной характеристикой насоса является зависимость его быстроты действия от давления на входе в насос (рис. 1.10). В широком рабочем диапазоне давлений  $S = \text{const}$ .

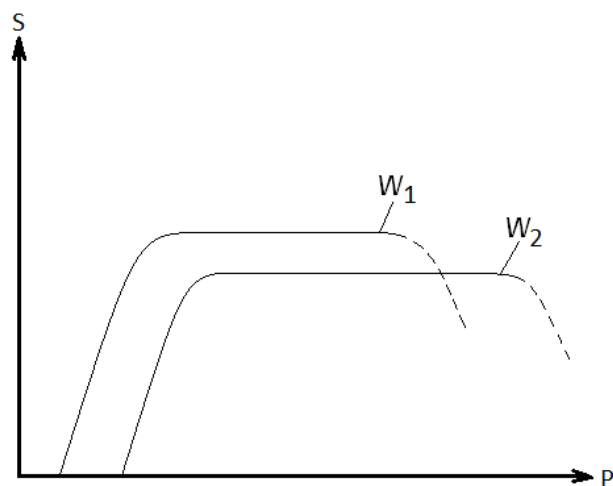


Рис. 1.10. Зависимость быстроты действия диффузионного насоса от впускного давления при разных мощностях подогрева ( $W_2 > W_1$ )

Быстрота действия уменьшается в области низких давлений из-за наличия обратного потока газа и паров из насоса в откачиваемый объект. При чрезмерном увеличении впускного давления повышается и выпускное давление насоса, которое лимитируется быстротой действия форвакуумного насоса. Если последний имеет недостаточную производительность, то происходит прорыв газа из области форвакуума в область высокого вакуума и резкое падение быстроты действия диффузионного насоса. Увеличивая мощность подогрева, можно несколько увеличить величину допустимого давления на выходе из диффузионного насоса, теряя при этом в быстроте действия (см. рис. 1.10).

### 1.6. Проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения газа

При молекулярном режиме течения газа проводимость протяженного канала может быть выражена через проводимость его входного отверстия и вероятность прохода молекул через данный канал, т.е. коэффициент Клаузинга  $K$ .

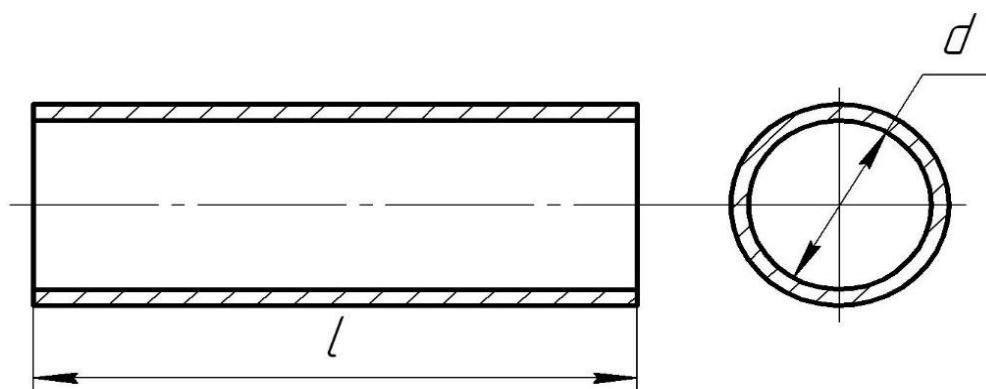
$$U = KU_{\text{отв}} = 36,4KF\sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (1.3)$$

При диффузном рассеянии отраженных от поверхностей молекул и равновесном состоянии газа на входе в канал вероятность прохода численно равна коэффициенту Клаузинга. Значения этого коэффициента для ряда каналов приведены в таблицах 1.3 – 1.4 [2, 3].

Таблица 1.3

**Коэффициент Клаузинга для труб круглого сечения длиной  $l$  и диаметром  $d$  (рис. 1.11)**

$l/d$	$K$	$l/d$	$K$	$l/d$	$K$	$l/d$	$K$
0,00	1,0000	1,1	0,4914	3,0	0,2807	20,0	0,0613
0,10	0,9092	1,2	0,4711	3,5	0,2537	25,0	0,0499
0,20	0,8341	1,3	0,4527	4,0	0,2316	30,0	0,0420
0,30	0,7711	1,4	0,4359	4,5	0,2131	35,0	0,0363
0,40	0,7177	1,5	0,4205	5,0	0,1973	40,0	0,0319
0,50	0,6720	1,6	0,4062	6,0	0,1719	45,0	0,0285
0,60	0,6320	1,7	0,3931	7,0	0,1523	50,0	0,0258
0,70	0,5970	1,8	0,3809	8,0	0,1367	500	0,0026
0,80	0,5659	1,9	0,3695	9,0	0,1240	св.500	$4d/3l$
0,90	0,5384	2,0	0,3589	10,0	0,1135		
1,00	0,5136	2,5	0,3146	15,0	0,0797		



1.11. Прямая труба круглого сечения

Коэффициент Клаузинга для щелевых каналов  
прямоугольного сечения  $a \gg b$ ,  $a > l$  (рис. 1.12)

$l/b$	$K$	$l/b$	$K$	$l/b$	$K$	$l/b$	$K$
0	1	0,9	0,7049	1,8	0,5640	3,4	0,4318
0,1	0,9525	1,0	0,6848	1,9	0,5525	3,6	0,4205
0,2	0,9096	1,1	0,6660	2,0	0,5417	3,8	0,4099
0,3	0,8710	1,2	0,6485	2,2	0,5215	4,0	0,3999
0,4	0,8362	1,3	0,6321	2,4	0,5032	5,0	0,3582
0,5	0,8048	1,4	0,6168	2,6	0,4865	6,0	0,3260
0,6	0,7763	1,5	0,6024	2,8	0,4712	8,0	0,2789
0,7	0,7503	1,6	0,5888	3,0	0,4570	10,0	0,2475
0,8	0,7266	1,7	0,5760	3,2	0,4439	$\infty$	$(b/l)\ln(l/b)$

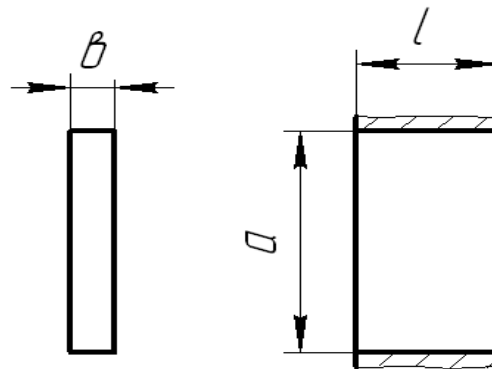


Рис. 1.12. Щелевой канал прямоугольного сечения:  
 $a \gg b$ ;  $a > l$

При выполнении инженерных расчетов проводимость сложных трубопроводов, имеющих  $n$  колен (поворотов), определяют по уравнению (1.3), но геометрическую длину трубопровода увеличивают:

$$l_p = l + 1,33dn. \quad (1.4)$$

Если трубопровод включает в себя несколько элементов (задвижки, переходники, колена и т.п.), соединённые последовательно, и проводимость каждого элемента может быть определена, то проводимость всего трубопровода находится из выражения:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \dots + \frac{1}{U_i}. \quad (1.5)$$

## 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

### 2.1 Лабораторная работа №1

#### Испытание механического вакуумного насоса

##### Цель работы

- Ознакомиться с конструкцией механического насоса с масляным уплотнением;
- определить остаточное давление, создаваемое насосом,  $p_0$ ;
- снять характеристики насоса (зависимости быстроты действия насоса и потребляемой мощности от давления откачиваемого газа  $S_H = f(p)$  и  $N_H = f(p)$ );
- построить график зависимости механического к.п.д. насоса от давления откачиваемого газа;
- дать заключение о техническом состоянии насоса.

##### Стенд для испытания насоса

Схема испытательного стенда показана на рис. 2.1.

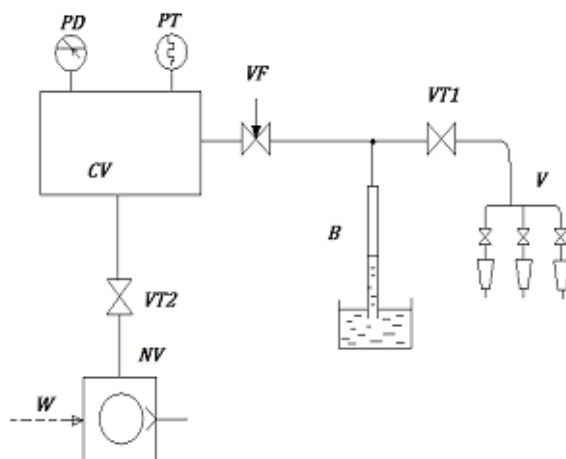


Рис. 2.1. Схема стенда для испытания механического вакуумного насоса с масляным уплотнителем:

- $NV$  – насос вакуумный вращательный объемный без газобалласта;  
 $CV$  – камера вакуумная;  $VF$  – вентиль дозирующий;  
 $VT1$  и  $VT2$  – вентили запорные;  $PD$  – вакуумметр деформационный;  
 $PT$  – вакуумметр тепловой;  $B$  – измерительная бюретка;  
 $V$  – ротаметры;  $W$  – ваттметр

Для измерения быстроты действия насоса применен метод постоянного давления. Испытательный стенд (рис.2.1) включает в себя:

- испытуемый насос  $NV$  с присоединённой к нему измерительной камерой  $CV$ ;
- аппаратуру для измерения давлений (вакуумметр деформационный  $PD$  и вакуумметр тепловой  $PT$ );
- устройства для измерения потока газа (бюретку  $B$  и ротаметры  $V$ );
- соединительную и запорную арматуру;
- ваттметр  $W$  для измерения мощности, потребляемой насосом.

### Методика проведения измерений

В процессе работы выполнить следующее:

1. Закрывать вентили  $VF$  и  $VT2$ , открыть вентиль  $VT1$ .
2. Включить насос  $NV$  и открыть вентиль  $VT2$ .
3. При зашкаливании вакуумметра  $PD$  включить вакуумметр  $PT$ .
4. Записать предельное остаточное давление  $p_0$ , создаваемое насосом, и потребляемую им при этом мощность  $W_0$ .
5. Не прекращая откачки, в измерительной камере  $CV$  устанавливать с помощью дозирующего вентиля  $VF$  поочередно разные давления (не менее трех значений в каждом десятичном диапазоне в интервалах от 2 до 3; от 5 до 6; от 8 до 10). При этом записывать показания вакуумметров  $PT$ ,  $PD$  и ваттметра  $W$ . Одновременно измерять ротаметрами  $V$  поток газа  $Q$ , поступающий в измерительную камеру через дозирующий вентиль  $VF$ .
6. Вести протокол наблюдения (табл. 2.1).

Таблица 2.1

#### Протокол наблюдений

№ опыта	Скорость подъема масла в бюретке, $\Delta h_6 / \Delta t$ , дел/с	Средняя высота столба масла в бюретке $h$ , мм	Расход газа по ротаметру $V$ , $\text{дм}^3/\text{мин}$	Показания вакуумметров		Показания ваттметра $W$ , Вт
				Деформационного $n$ , дел	Термопарного, мм.рт. ст.	
1						
...						

### Дополнительные данные

Барометрическое давление –  $p_6$ , мм рт.ст.

Цена деления бюретки:  $C_6 = 0,1 \text{ см}^3/\text{дел.}$

Цена деления образцового вакуумметра:  $ц_6 = \frac{p_6 \cdot 133,3}{250}$ , Па/дел.

### Методика обработки опытных данных

1. Измеренный с помощью бюретки поток газа:

$$Q = \frac{\Delta h_6}{\Delta \tau} \cdot C_6 \cdot \left( p_6 - h \cdot \frac{\rho_m}{\rho_{рт}} \right), \quad (2.1)$$

где  $Q$  – поток газа,  $\frac{\text{дм}^3 \cdot \text{мм рт.ст.}}{\text{с}}$ ;

$\Delta h_6$  – изменение уровня масла в бюретке (делений) за время  $\Delta \tau$ , с;

$C_6$  – цена деления бюретки,  $\text{дм}^3/\text{дел.}$ ;

$p_6$  – барометрическое давление, мм рт.ст.;

$h$  – средняя высота столба масла в бюретке в момент измерения, мм;

$\rho_m = 0,85 \text{ кг/дм}^3$  – плотность масла;

$\rho_{рт} = 13,5 \text{ кг/дм}^3$  – плотность ртути

2. Давление, измеренное по вакууметру  $PD$ , равно:

$$p = p_6 \cdot \left( 1 - \frac{n}{N} \right), \quad (2.2)$$

где  $p$  – давление, мм рт.ст.;

$n$  – отсчет измеряемого давления в делениях шкалы;

$N$  – число делений шкалы прибора, соответствующего разности показаний при  $p = p_6$  и  $p = 0$ .

3. Быстрота действия испытуемого насоса (расход по бюретке):

$$S = \frac{Q}{p}. \quad (2.3)$$



4. Быстрота действия испытуемого насоса (расход по ротаметру):

$$S = \frac{V \cdot p_6}{60 \cdot p} \quad (2.4)$$

### Обработка результатов измерений

1. Рассчитываем поток газа  $Q$ , измеренный с помощью бюретки, по формуле 2.1.

2. Определяем давление в камере по формуле (2.2).

3. Определяем быстроту действия насоса по формулам (2.3) и (2.4) в зависимости от того, по бюретке или с помощью расходомеров измерен поток газа  $Q$ ;

4. Заполняем табл. 2.2.

Таблица 2.2

### Результаты испытания

№ опыта	Давление в камере $p$ , мм рт.ст.	Быстрота действия насоса $S$ , $\text{дм}^3/\text{с}$	Потребляемая насосом мощность $W$ , Вт	Примечание
1				
...				

5. Построить характеристики насоса в полулогарифмических координатах  $\lg p - S$ ,  $\lg p - W$ .

6. Используя график  $\lg p - W$ , построить график изменения механического к.п.д. насоса  $\eta_{\text{мех}}$  в зависимости от давления в камере:

$$\eta_{\text{мех}} = \frac{W_{\text{сж}}}{W} = \frac{W - W_{\text{T}}}{W}.$$

7. Дать оценку технического состояния насоса.

### Оформление отчета по работе

Отчет должен содержать:

1. Краткое изложение задач испытания.

2. Схему испытательного стенда с указанием его элементов.

3. Протокол наблюдений (табл.2.1).
4. Результаты испытания (табл.2.2).
5. Графики  $\lg p - S$ ,  $\lg p - W$  и  $\lg p - \eta_{\text{мех}}$ .
6. Сравнение паспортных и полученных значений величин  $p_0$ ,  $S$ ,  $W$  насоса.
7. Обоснованное заключение о техническом состоянии насоса.

## **2.2. Лабораторная работа №2**

### **Испытание диффузионного вакуумного насоса**

Испытание насоса проводится с целью оценки степени его совершенства и пригодности к эксплуатации.

При этом определяют:

1. Предельное остаточное давление  $p_0$ .
2. Зависимость быстроты действия насоса от давления откачиваемого газа  $S_n = f(p_{\text{вх}})$ .
3. Наибольшее выпускное давление  $p_{\text{вып max}}$ .
4. Зависимость вакуум-фактора от давления откачиваемого газа  $\Phi = f(p_{\text{вх}})$ .
5. Зависимость термодинамического к.п.д. от давления откачиваемого газа  $\eta = f(p_{\text{вх}})$ .

Указанные выше параметры и зависимости следует определить при нормальной мощности нагревателя  $N_{\text{ном}}$  и при завышенных её значениях.

В качестве откачиваемого газа следует применять сухой воздух, имеющий точку росы не выше 233 К.

### **Испытательный стенд и методика проведения измерений**

Испытание насоса проводится на стенде, схема которого показана на рис. 2.2.

Предельное остаточное давление измеряют в следующем порядке:

1. Включают испытуемый насос  $ND$ , согласно инструкции по эксплуатации.
2. Откачивают измерительную камеру  $CV$  при закрытом напекателе  $VFI$  до установления в ней равновесного давления. Это значение принимают за предельное остаточное давление  $p_0$ .

Быстроту действия измеряют методом постоянного давления следующим образом: откачивают испытуемым насосом  $ND$  газ из измерительной камеры  $CV$  до предельного остаточного давления  $p_0$ . Не прекращая откачки, в измерительной камере устанавливают натекателем  $VF1$  давление газа  $p_{вх}$ , при котором требуется измерить быстроту действия насоса. Одновременно измеряют бюреткой  $B$  поток газа  $Q$ , поступающего в измерительную камеру через натекатель. Кроме того, снимают показания амперметра  $A$ , вольтметра  $V$  и вакуумметра  $PT2$  ( $p_{вып}$ ).

Для получения зависимости между быстротой действия испытуемого насоса и давлением  $p_{вх}$  в камере ( $S_n = f(p_{вх})$ ) следует выполнить указанные выше измерения при различных давлениях  $p_{вх}$  на менее трех раз в каждом десятичном диапазоне (в интервалах от 2 до 3; от 5 до 6; от 8 до 10). Измерения начинают с низкого давления.

Наибольшее выпускное давление  $p_{вып\ max}$  при предельном остаточном давлении измеряют в следующем порядке:

1. Измерительную камеру  $CV$  откачивают до предельного остаточного давления  $p_0$ .

2. С помощью натекателя  $VF2$  на выходном трубопроводе увеличивают давление в измерительной камере до  $1,5 p_0$ . Давление, измеренное в этот момент вакуумметром  $PT2$ , принимают за наибольшее выпускное давление насоса  $p_{вып\ max}$ .

После проведения данной серии испытаний, соответствующих оптимальной (паспортной) мощности  $N_{ном}$  нагревателя диффузионного насоса, следует выполнить аналогичные измерения при мощности нагревателя  $N = 0,8 N_{ном}$  и  $N = 1,2 N_{ном}$ .

Все данные заносят в табл. 2.3.

Таблица 2.3

### Протокол наблюдений

№ опыта	Параметры нагревателя		Давление $p \cdot 10^3$ , мм рт. ст.			Скорость подъема масла в бюретке $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ , дел/с	Средняя высота столба масла в бюретке $h$ , мм
	Ток, А	Напряжение, В	РА	PT1	PT2		
	A						
1							
...							

### Дополнительные данные

Барометрическое давление  $p_6 =$  \_\_\_\_\_ мм рт.ст.

Плотность масла в бюретке  $\rho_m = 0,8$  г/см<sup>3</sup>.

Плотность ртути  $\rho_{рт} = 13,5$  г/см<sup>3</sup>.

Цена деления бюретки  $C_6 = 0,1$  см<sup>3</sup>/дел.

Диаметр входного отверстия испытуемого насоса  $D = 8,6$  см.

Диаметр сопла первой ступени  $d = 4,0$  см.

Температура в помещении  $T =$  \_\_\_\_\_ К.

### Паспортные данные насоса

Быстрота действия насоса  $S_n = 0,1$  м<sup>3</sup>/с.

Минимальное остаточное давление  $p_o = 2 \cdot 10^{-3}$  Па.

Наибольшее выпускное давление  $p_{вып\ max} = 39,9$  Па.

Мощность нагревателя  $W_H = 500$ Вт.

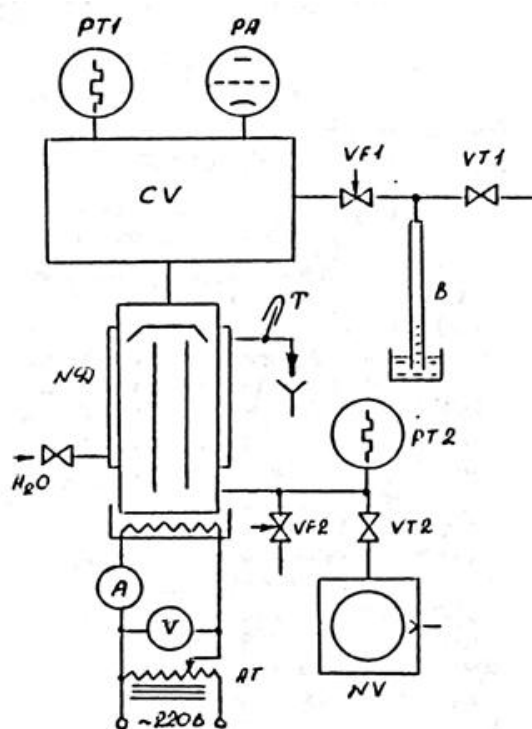


Рис. 2.2. Схема стенда для испытания диффузионного вакуумного насоса:

$CV$  – камера вакуумная;  $ND$  – насос диффузионный;

$NV$  – насос форвакуумный;  $PT$  – преобразователь манометрический термопарный;  $PA$  – преобразователь манометрический ионизационный;  $VF1$  – натекатель;  $B$  – измерительная бюретка;  $AT$  – автотрансформатор;  $VT$  – вентиль запорный;  $T$  – термометр;  $A$  – амперметр;  $V$  – вольтметр

## Методика обработки опытных данных

1. Мощность нагревателя:

$$W = U \cdot I, \quad (2.5)$$

где  $W$  – мощность нагревателя, Вт;

$I$  – сила тока, А;

$U$  – напряжение, В.

2. Предельное остаточное давление определяется по вакуумметру  $PA$  при закрытом натекателе  $VF1$ :

$$p_o = p_{вх} \text{ (при } Q = 0), \quad (2.6)$$

где  $p_{вх}$  – давление в камере, мм рт.ст.

3. Наибольшее выпускное давление определяется по вакуумметру  $PT2$  при  $p_{вх} = 1,5 \cdot p_o$  и закрытом натекателе  $VF1$ :

$$p_{\text{вып max}} = p_{\phi} \text{ (при } p_{вх} = 1,5 \cdot p_o \text{ и } Q = 0), \quad (2.7)$$

где  $p_{\phi}$  – давление на выходе из диффузионного насоса.

4. Поток газа  $Q$ , поступающий в камеру через натекатель  $VF1$ :

$$Q = \frac{\Delta h}{\Delta \tau} \cdot C_6 \cdot (p_6 - h \cdot \frac{\rho_m}{\rho_{рт}}), \quad (2.8)$$

где  $Q$  поток газа,  $\frac{\text{дм}^3 \cdot \text{мм рт.ст}}{\text{с}}$ ;

$\Delta h_6$  – изменение уровня масла в бюретке, (делений) за время  $\Delta \tau$ , с;

$C_6$  – цена деления бюретки,  $\text{дм}^3/\text{дел}$ ;

$p_6$  – барометрическое давление, мм рт.ст;

$h$  – средняя высота столба масла в бюретке в момент измерения, мм;

$\rho_m = 0,85 \text{ кг/дм}^3$  – плотность масла;

$\rho_{рт} = 13,5 \text{ кг/дм}^3$  – плотность ртути.

5. Быстрота действия насоса  $S_n$ ,  $\text{дм}^3/\text{с}$ :

$$S_{\text{н}} = \frac{Q}{p_{\text{вх}}}. \quad (2.9)$$

6. Вакуум-фактор – отношение фактической быстроты действия  $S_{\text{н}}$  насоса к теоретической максимально возможной скорости действия  $S_{\text{т}}$ :

$$\Phi = \frac{S_{\text{н}}}{S_{\text{т}}} = \frac{S_{\text{н}}}{3,64 \cdot F \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}}, \quad (2.10)$$

где  $F = \frac{\pi}{4} D^2 - d^2$  – площадь входного отверстия насоса, см<sup>2</sup>;

$T$  – температура откачиваемого газа, К;

$\mu$  – молекулярная масса откачиваемого газа.

7. Термодинамический к.п.д.:

$$\eta = \frac{S_{\text{н}} \cdot \rho \cdot R \cdot \ln p_{\text{вып}} / p_{\text{вх}}}{\mu \cdot W}, \quad (2.11)$$

где  $S_{\text{н}}$  – быстрота действия насоса, м<sup>3</sup>/с;

$R = 8314$  Дж/(кмоль · К) – универсальная газовая постоянная;

$T$  – температура откачиваемого газа (температура в помещении), К;

$p_{\text{вып}}$  и  $p_{\text{вх}}$  – давление на входе из насоса и на выходе;

$\mu$  – молекулярная масса откачиваемого газа, кг/кмоль;

$W$  – мощность, расходуемая на работу насоса, Вт;

$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p_{\text{вх}} \cdot T_0}{p_0 \cdot T}$  – плотность откачиваемого газа при давлении  $p_{\text{вх}}$ , кг/м<sup>3</sup>;

$p_0$  и  $T_0$  – давление и температура газа при н.у.;

$\rho_0$  – плотность откачиваемого газа при н.у., кг/м<sup>3</sup>.

8. Полученные данные свести в табл. 2.4.

9. Построить характеристику насоса в полулогарифмических координатах  $\lg p - S_{\text{н}}$ ,  $\lg p - \Phi$  и  $\lg p - \eta$  при различных значениях  $W$ .

10. Дать оценку технического состояния насоса.

### Результаты испытаний

№ опыта	Мощность $W$ , Вт	Давление, Па				Быстрота действия $S_n$ , м <sup>3</sup> /с	Вакуум- фактор, $\Phi$	Термодина- мический к.п.д $\eta$
		$P_o$	$P_{вх}$	$P_{вып\ max}$	$P_{\phi}$			
1								
...								

### Оформление отчета по работе

Отчет должен содержать:

1. Краткое изложение задач испытания.
2. Схему испытательного стенда с указанием его элементов.
3. Протокол наблюдений (табл.2.3).
4. Результаты испытания (табл.2.4).
5. Графики  $\lg p - S_n$ ,  $\lg p - \Phi$  и  $\lg p - \eta$  для всех значений мощности нагревателя  $W$ .
6. Сравнение паспортных и полученных значений величин  $p_o$ ,  $S_n$ ,  $p_{вып\ max}$  и  $W$ .
7. Обоснованное заключение о техническом состоянии насоса.

### Лабораторная работа №3 Измерение проводимости трубопровода

#### Цель работы

Измерение проводимости трубопровода проводится для демонстрации влияния на проводимость рода откачиваемого газа и определения давления, при котором становится некорректным использование коэффициента Клаузинга.

При этом определяют:

1. Проводимость трубопровода при молекулярном течения азота.
2. Проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения гелия.
3. Влияние давления откачиваемого газа на проводимость трубопровода.

## Испытательный стенд и методика проведения испытаний

Измерение проводимости трубопровода проводится на стенде, схема которого показана на рис. 2.3.

Проводимость трубопровода измеряют в следующем порядке:

1. Все вентили закрыты.
2. Через вентиль *VT1* заполняют газгольдер *G* соответственно азотом или гелием.
3. Включают форвакуумный насос *NV*, открывают вентиль *VT3* и откачивают полость диффузионного насоса *ND*, ловушку *L*, камеры *CV1*, *CV2* и испытуемый трубопровод *Tr*.
4. Включают тепловые вакуумметры *PT1* и *PT2*.
5. При снижении давления в системе ниже 10 Па в ловушку *L* заливают жидкий азот и включают диффузионный насос *ND*.
6. При снижении давления в системе ниже  $10^{-1}$  Па включают ионизационные вакуумметры *PA1* и *PA2*.
7. При снижении давления ниже  $10^{-2}$  Па приоткрывают дозирующий вентиль *VF* и устанавливают давление в камере *CV1* примерно  $5 \cdot 10^{-2}$  Па.
8. Приоткрывая вентиль *VT2*, 2–3 раза пополняют бюретку *B* газом из газгольдера *G*. Проведя таким образом «полоскание» полости бюретки газом из газгольдера, приступают к измерению проводимости трубопровода при откачке соответственно азота или гелия.  
Для этого дозирующим вентилем *VF* устанавливают в камере *CV1* давление  $10^{-2}$  Па. Измеряют скорость подъема масла в бюретке, среднюю высоту столба масла в бюретке и давление в камера *CV2*.
9. Затем давление в камере *CV1* ступенчато повышают, приоткрывая дозирующий вентиль *VF*, и проводят указанные измерения при каждом новом фиксированном значении давления в камере *CV1*.
10. Все данные заносятся в табл. 2.5.



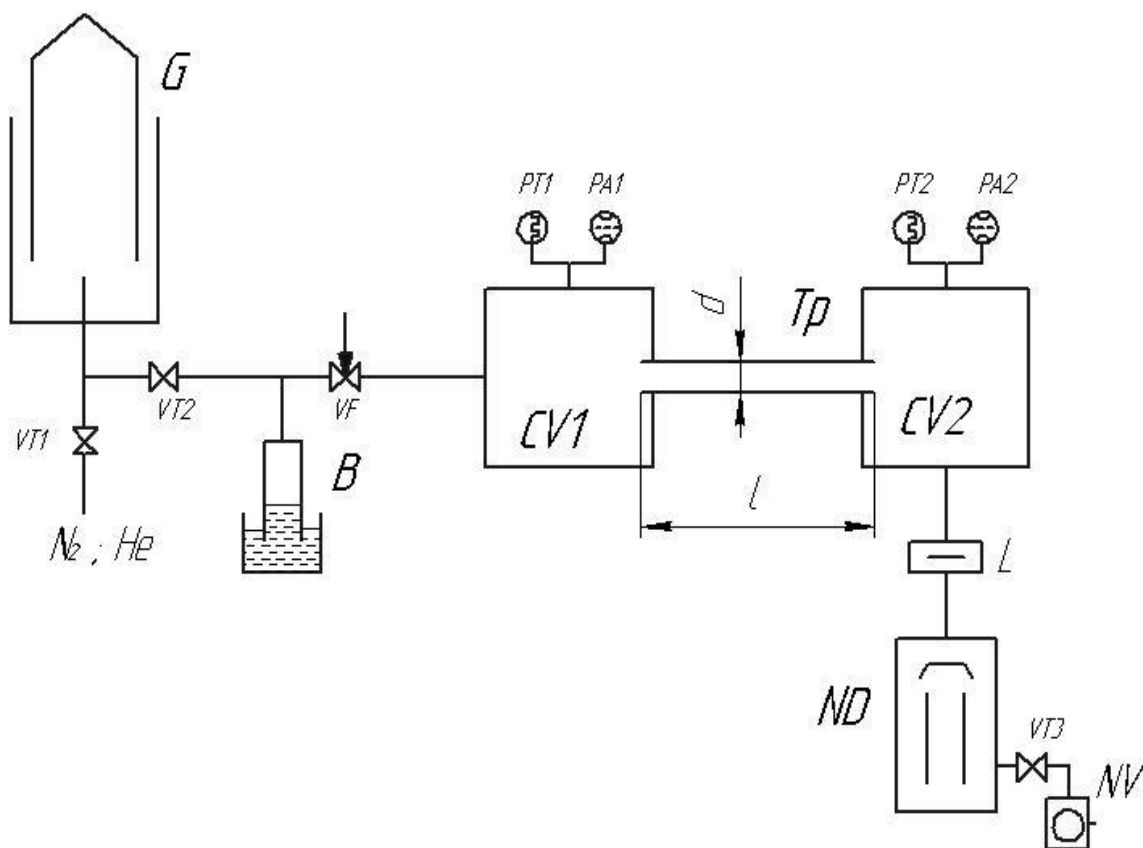


Рис. 2.3. Схема стенда для измерения проводимости трубопровода:  
 $T_p$  – труба с внутренним диаметром  $d$  и длиной  $l$ ;  
 $CV1$  и  $CV2$  – камеры вакуумные;  $PT1$  и  $PT2$  – вакуумметры тепловые;  
 $PA1$  и  $PA2$  – вакуумметры ионизационные;  $L$  – азотная ловушка;  
 $ND$  – насос диффузионный;  $NV$  – насос форвакуумный;  $G$  – газгольдер;  
 $B$  – измерительная бюретка;  $VF$  – вентиль дозирующий;  
 $VT1, VT2, VT3$  – вентили запорные

Таблица 2.5

### Протокол наблюдений

№ опыта	Газ	Показания вакуумметров, Па				Скорость подъема масла в бюретке $\frac{\Delta h}{\Delta \tau}$ , дел/с	Средняя высота столба масла в бюретке $h$ , мм
		$PT1$	$PA1$	$PT2$	$PA2$		
1							
...							

### Дополнительные данные

Барометрическое давление  $p_6 = \underline{\hspace{2cm}}$  мм рт.ст.

Плотность масла в бюретке  $\rho_m = 0,8$  г/см<sup>3</sup>.

Плотность ртути  $\rho_{рт} = 13,5$  г/см<sup>3</sup>.

Цена деления бюретки  $C_6$ , дм<sup>3</sup>/дел.

Температура в помещении  $T$ , К.

Диаметр трубопровода  $d$ , м.

Длина трубопровода  $l$ , м.

### Обработка результатов измерений

1. Поток газа  $Q$ , поступающий в камеру  $CV1$  и проходящий по трубопроводу,  $\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}}$ :

$$Q = 133,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta \tau} \cdot C_6 \left( p_6 - h \frac{\rho_m}{\rho_p} \right). \quad (2.12)$$

2. Проводимость трубопровода  $U$  (при давлении в камере  $CV1$   $p_1 = 10^{-2} \dots 10^1$  Па),  $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ :

$$U = \frac{Q}{p_1 - p_2}, \quad (2.13)$$

где  $p_1$  – давление в камере  $CV1$ , Па;

$p_2$  – давление в камере  $CV2$ , Па.

3. Проводимость трубопровода  $U_K$ ,  $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ , рассчитанная с использованием коэффициента Клаузинга,

$$U_K = 36,4 \cdot K \cdot \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (2.14)$$

где  $T$  – температура в помещении, К;

$M$  – молекулярная масса газа, кг/кмоль;

$K$  – коэффициент Клаузинга для отношения  $l/d$  [1].

4. Отношение

$$\frac{U}{U_K}.$$

5. Полученные результаты свести в табл. 2.6.

Таблица 2.6

### Результаты испытаний

№ опыта	Газ	Проводимость трубопровода, $\frac{M^3}{c}$		Отношение $\frac{U}{U_K}$
		Опытная $U$	Рассчитанная $U_K$	
1				
...				

### Оформление отчета по работе

Отчет должен включать в себя следующее:

1. Краткое изложение задач испытания.
2. Схему стенда и её описание.
3. Протокол наблюдений (табл.2.5).
4. Результаты испытаний (табл.2.6.).
5. Выводы.

### Лабораторная работа №4 Температурная транспирация

#### Цель работы

Цель работы состоит в ознакомлении на действующем стенде с явлением возникновения различной концентрации газа в системе, имеющей элементы с разной температурой.

При этом определяют:

1. Давления (концентрации газа) в двух соединённых между собой элементах вакуумной системы, когда их температура одинакова и равна температуре в помещении.

2. Возникновение разницы концентраций в элементах системы, когда один из них охлаждается (возникновение температурной транспирации).

3. Влияние на разность концентраций в элементах системы разности их температур.

### Испытательный стенд и методика проведения испытаний

Исследование явления температурной транспирации проводится на стенде, схема которого показана на рис. 2.4.

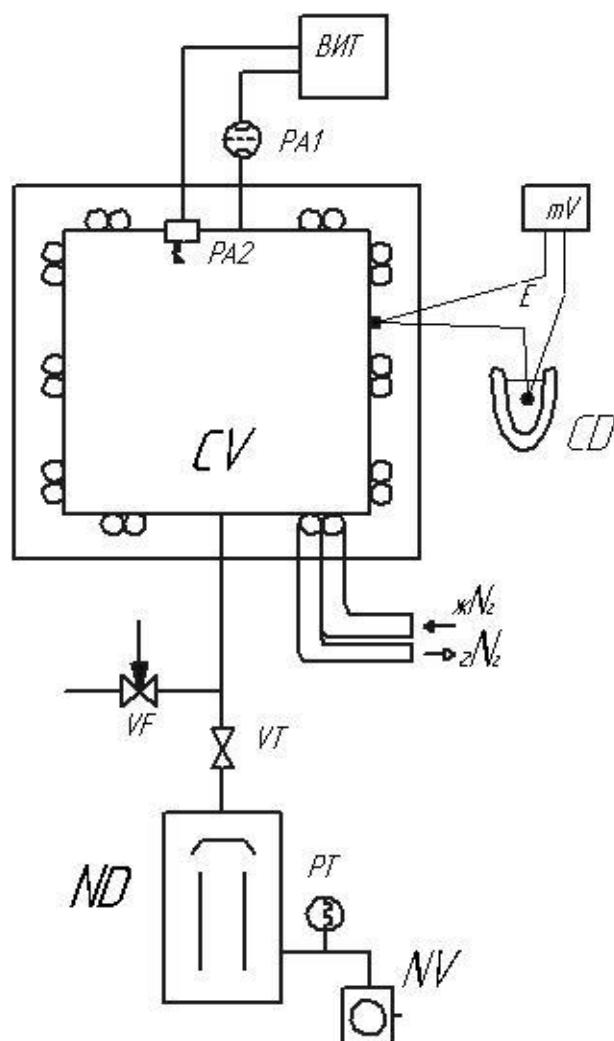


Рис. 2.4. Схема стенда для исследования температурной транспирации:  
*CV* – термостатируемая камера; *PA1* и *PA2* – ионизационные вакуумметры;  
*PT* – тепловой вакуумметр; *ND* – диффузионный вакуумный насос;  
*CD* – сосуд Дьюара; *VF* – вентиль дозирующий;  
*VT* – вентиль запорный; *E* – термопара

Термостатируемая камера представляет собой сосуд объемом  $V_k = 8,4 \text{ дм}^3$ , на который бифилярно припаян змеевик и нанесена тепловая изоляция. Камера откачивается вакуумной системой, включающей в себя диффузионный  $ND$  и форвакуумный насосы. Давление в камере измеряют двумя датчиками. Датчик  $PA1$  смонтирован вне камеры. Объем колбы этого датчика  $V_d$  служит сосудом, который находится при температуре окружающей среды (температура в помещении) и связан с объемом термостатируемой камеры  $CV$ . Причем, объем  $V_k \gg V_d$ . Второй датчик  $PA2$  смонтирован внутри термостатируемой камеры. Температуру стенок камеры  $CV$  измеряют дифференциальной термопарой.

После вакуумирования камеры  $CV$  до давления по  $PA1$   $p_1 < 5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$  её отсекают вентилем  $VT$  от вакуумной системы. Убедившись в отсутствии натекания в камеру, проводят измерения давления в ней датчиками  $PA1$  и  $PA2$ .

Затем в змеевик камеры  $CV$  подают жидкий азот, охлаждая ступенчато её стенки до температуры  $T_2 = 200 \text{ К}, 150 \text{ К}, 100 \text{ К}$ , снимая показания датчиков  $PA1$  и  $PA2$  на каждом из перечисленных выше температурных уровнях.

Все выше перечисленные операции повторить после замены воздуха в камере  $CV$  на гелий, который три раза напускается в камеру через натекаТЕЛЬ  $VF$  и откачивается.

Все данные измерений заносятся в табл. 2.7.

Таблица 2.7

### Протокол наблюдений

№ опыта	Газ	Температура, К		Показания датчиков	
		$T_1$	$T_2$	$PA1$	$PA2$
1					
...					

*Примечание:*  $T_1$  – температура колбы датчика  $PA1$ ;  $T_2$  – температура стенки камеры  $CV$ ; датчики  $PA1$  и  $PA2$  регистрируют концентрацию газа в объекте.

Дополнительные данные

Температура в помещении  $T_1 = \underline{\hspace{2cm}}$  К.

### Обработка результатов измерений

При обработке результатов измерений учесть, что объем колбы датчика  $PAI$   $V_{л}$  несопоставимо мал по сравнению с объемом камеры  $V_{к}$ . Следовательно, перетекание части газа из колбы в камеру, при охлаждении последней, не может заметно изменить концентрацию газа в камере, т.е.  $n_{к} = \text{const}$  (если не будет сорбции молекул газа на охлажденных стенках камеры).

1. Учитывая закономерность температурной транспирации, определить отношение концентрации газа в камере  $CV$  и колбе датчика  $PAI$ :

$$\frac{n_{к}}{n_{л}} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}.$$

2. Определить отношение давлений газа в камера  $CV$  и колбе датчика  $PAI$ :

$$\frac{p_{к}}{p_{л}} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}.$$

3. Полученные результаты расчетов и опытные данные свести в табл. 2.8.

Таблица 2.8

#### Результаты исследования

№ опыта	Газ	Отношения				Расчет $\frac{p_{к}}{p_{л}}$
		$\frac{T_1}{T_2}$	Расчет $\frac{n_{к}}{n_{л}}$	Опыт $\frac{n_{к}}{n_{л}}$	$\frac{T_2}{T_1}$	
1						
...						

### Оформление отчета по работе

Отчет должен включать в себя следующее:

1. Краткое изложение задач испытания.
2. Схему стенда и её описание.
3. Протокол наблюдений (табл.2.7).
4. Результаты исследований (табл.2.8).
5. График тарировочной кривой термопары.
6. Выводы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакуумная техника: Справ. / Под ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. – М.: Машиностроение, 2009. – 509 с.
2. **Иванов В.И.** Вакуумная техника: Учеб. пособие – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 129 с.
3. **Демихов К.Е.** Вакуумные системы: Учеб. пособие – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 76 с.

**Иванов Владислав Иванович  
Соколова Екатерина Владимировна**

**ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

**Учебно-методическое пособие**

*Ответственный редактор*  
Т.Г. Смирнова

*Компьютерная верстка*  
И.В. Гришко

*Дизайн обложки*  
Н.А. Потехина

---

Подписано в печать 10.11.2016. Формат 60×84 1/16  
Усл. печ. л. 2,33. Печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,25  
Тираж 40 экз. Заказ № С 49

---

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9