

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Т.И. Данилина

ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Методические указания
по выполнению лабораторных работ

Томск 2025

УДК 621.52
ББК 31.77
Д18

Одобрено на заседании кафедры физической электроники протокол №162 от 07.11.2024 года

Рецензент:

Смирнов Серафим Всеволодович,
доктор технических наук, профессор кафедры физическая электроника ФГАОУ ВО
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Данилина, Тамара Ивановна
Д18 Основы вакуумной техники: Методические указания по выполнению лабораторных работ / Т.И. Данилина - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 28 с.

Пособие является руководством для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Основы вакуумной техники». Кратко освещены теоретические вопросы об основных устройствах вакуумной техники, используемых при выполнении лабораторных работ, указан порядок выполнения лабораторных работ.

Для студентов высших учебных заведений технических специальностей.

УДК 621.52
ББК 31.77

Данилина Тамара Ивановна
ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ
Методические указания по выполнению лабораторных работ

© Данилина Т.И., 2025
© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ С МАСЛЯНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ	5
2. ПАРОМАСЛЯНЫЕ ДИФФУЗИОННЫЕ НАСОСЫ.....	9
3. ТЕПЛОВЫЕ ВАКУУММЕТРЫ	15
4. ВАКУУМНЫЕ НАПЫЛИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ	22

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания по выполнению лабораторных работ по курсу «Основы вакуумной техники» представляют собой описания лабораторных работ с краткими теоретическими сведениями и порядком выполнения работ. В методических указаниях сформулирована для каждой работы цель и требования к отчету, приводится рекомендуемый список литературы.

Описанные лабораторные работы реализуются с использованием технологических вакуумных установок, обеспечивающих предварительное разряжение (понижение давления до 10^{-1} Па) и высокий вакуум (разряжение газа в объеме до 10^{-4} Па). Для измерения соответствующих диапазонов давлений в лабораторных работах используются различные средства измерения вакуума.

1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ С МАСЛЯНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ

1.1 Цель работы

Изучить принцип действия механического насоса объемного типа с масляным уплотнением (макет), получить экспериментальную кривую откачки и рассчитать параметры установки.

1.2 Краткие теоретические сведения

Механические вакуумные насосы объемного типа с масляным уплотнением предназначены для обеспечения и поддержания в откачиваемом объеме низкого и среднего вакуума. Действие этих насосов основано на периодическом поступлении в рабочую камеру насоса откачиваемого газа и выталкивании его путем сжатия при уменьшении объема рабочей камеры.

Любые насосы независимо от принципа действия характеризуются следующими общими параметрами:

1) наибольшее давление запуска вакуумного насоса p_z - наибольшее давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу;

2) наибольшее выпускное давление вакуумного насоса $p_{\text{вып}}$ - наибольшее давление в выходном сечении насоса, при котором он может осуществлять работу;

3) предельное или остаточное давление насоса $p_{\text{пр}}$ - это минимальное давление, которое может обеспечить насос, работая без откачиваемого объекта. Быстрота действия насоса, при приближении к предельному давлению, стремится к нулю. Предельное давление большинства вакуумных насосов определяется равновесием между откачиваемым потоком газа и обратными потоками газа и вредного пространства, вследствие растворимости газа в масле насоса, газоотделения со стенок насоса и т.д.;

4) быстрота действия S_n объем газа при данном давлении, откачиваемый в единицу времени. Быстрота откачки относится к сечению, в котором измерено давление;

5) производительность вакуумного насоса - это поток газа во входном сечении насоса при данном давлении.

Кроме этих основных параметров существуют дополнительные эксплуатационные параметры насосов.

Быстрота откачки насоса S_n определяется как объем газа dV_n , удаляемый за единицу времени при том давлении, которое существует на входе насоса $p_{\text{вх}}$

$$S_n = \frac{dV_n}{dt}$$

С другой стороны, быстрота откачки есть отношения потока газа Q , откачиваемого насосом, ко входному давлению

$$S_n = \frac{Q}{p_{вх}}$$

Быстрота откачки в широкой области рабочих давлений обычно не зависит от давления.

Производительность насоса определяется как

$$Q = p_{вх} S_n$$

Быстрота откачки объекта S_0 – это объем газа при данном давлении p_0 , откачиваемый в единицу времени через сечение вакуумного трубопровода, соединяющего объект откачки с насосом

$$S_0 = \frac{Q}{p_0}$$

где Q – поток газа, проходящий через трубопровод.

Величина S_0 получила название эффективной скорости откачки.

Вакуумный трубопровод характеризуется проводимостью U

$$U = \frac{Q}{p_1 - p_2}$$

где $(p_1 - p_2)$ – разность давлений на концах трубопровода.

Быстроту откачки S_0 определяют по скорости действия насоса S_n и проводимости U трубопровода, соединяющего насос с объектом, при условии постоянства потока газа $Q = \text{const}$. Из условия

$$Q = S_0 p_0 = U(p_0 - p_{вх}) = S_n p_{вх} = \text{const}$$

следует

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}$$

или

$$S_0 = \frac{S_n \cdot U}{S_n + U}$$

Уравнение (1.2) представляет собой основное уравнение вакуумной техники, которое выражает отличие быстроты откачки объекта S_0 от скорости действия насоса S_n при наличии трубопровода проводимостью U . При $U \gg S_n$ влияние трубопровода незначительно и $S_0 \approx S_n$; при $U \ll S_n$ быстрота откачки объекта определяется проводимостью трубопровода, т.е. $S_0 \approx U$.

Коэффициент использования насоса $K_{и}$ определяется:

$$K_{и} = \frac{S_0}{S_n}.$$

Он может меняться от 1 до 0 в зависимости от проводимости трубопровода.

1.3 Методика выполнения лабораторной работы

Для определения скорости откачки механических насосов пригоден метод постоянного объема. Насос присоединяют к объему V , большому для замедления падения давления, через трубопровод с большой пропускной способностью. В этом случае имеем

$$S_n = 2,3 \frac{V}{\Delta t} \cdot \lg \frac{p_1}{p_2},$$

где p_1 и p_2 – два значения давления газа на измеренной зависимости падения давления во времени;

Δt – интервал времени.

В этом методе получают усредненные значения величины S_n для интервала давлений от p_1 до p_2 . При приближении к предельному давлению (при давлениях $p \leq 10p_{пр}$) расчет величины S_n следует производить с помощью соотношения

$$S_n = \frac{2,3 \cdot V}{\Delta t} \cdot \lg \frac{(p_1 - p_{пр})}{(p_2 - p_{пр})}$$

Определение характеристик механических вакуумных насосов с масляным уплотнением осуществляют на вакуумной установке, принципиальная схема которой показана на рис. 1.1.

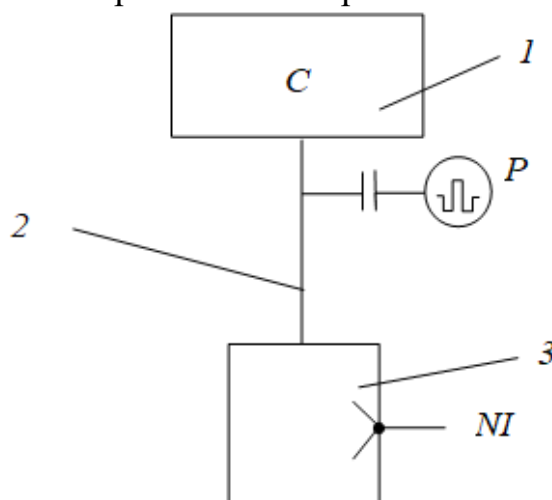


Рис. 1.1 Схема экспериментальной установки: 1 – камера вакуумная; 2 – трубопровод; 3 – механический вакуумный насос; P – вакуумметр

На экспериментальной установке давления газа измеряются при высоких давлениях деформационным вакуумметром, а при более низких – тепловым вакуумметром. Поскольку датчики вакуумметров подсоединены к рабочему объему, то кривая откачки будет показывать изменение давления в рабочем объеме. Поэтому с использованием этой зависимости можно определить эффективную скорость откачки рабочего объема по формуле (1.3). Объем рабочей камеры установки УВН-2М равен 0,12 м³.

1.4 Порядок выполнения работы

- 1) Определить тип насоса на экспериментальной установке;
- 2) Определить по справочнику параметры данного насоса;
- 3) Получить экспериментальную зависимость давления от времени откачки для рабочего объема;

4) Рассчитать быстроту действия откачки S_0 на всем диапазоне давлений, проводимость трубопровода U , K_n и определить предельное давление для рабочего объема.

1.5 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) основные расчетные соотношения;
- 2) схему вакуумной установки;
- 3) экспериментальную кривую откачки и расчеты;
- 4) расчетные параметры;
- 5) выводы

2. ПАРОМАСЛЯНЫЕ ДИФФУЗИОННЫЕ НАСОСЫ

2.1 Цель работы

Изучить принцип действия и конструкцию паромасляного диффузионного насоса; исследовать основные характеристики насоса.

2.2 Краткие теоретические сведения

Диффузионные насосы применяют для откачки различных вакуумных систем до остаточных давлений $10^{-1} - 10^{-5}$ Па и ниже. При таких давлениях длина свободного пути молекул откачиваемого газа практически всегда больше диаметра впускного отверстия насоса и поэтому в нем всегда возникает молекулярный режим течения газа. Молекулы газа при тепловом движении через впускное отверстие насоса направляются к паровой струе. Механизм увлечения газа в диффузионных насосах обусловлен диффузионными процессами. Вследствие разности концентрации газа над паровой струей и в самой струе (концентрация газа в струе вблизи сопла пренебрежимо мала) происходит диффузия газа в струю. Попад в струю, молекулы газа получают импульсы от молекул пара в направлении парового потока и уносятся вместе со струей к стенке корпуса насоса. Пар конденсируется на охлаждаемой стенке, а газ, сжатый в струе до выпускного давления, перетекает вдоль стенки в пространство над следующей ступенью насоса.

На параметры диффузионных насосов существенное влияние оказывает вредные процессы: обратная диффузия молекул газа через струю пара от выпускного отверстия к впускному; отражение молекул газа в сторону откачиваемого объема за счет отталкивающего действия молекул пара; газоотделение внутренних поверхностей насоса; вынос газов паровой струей из кипятильника.

Быстрота действия насоса в рабочем диапазоне давлений не зависит от впускного давления и уменьшается в области низких и высоких давлений. Уменьшение быстроты действия при низких давлениях обусловлено тем, что в этой области проявляется противодиффузия газа через паровую струю.

В паромасляных диффузионных насосах используются рабочие жидкости органического происхождения с низким давлением насыщенных паров $10^{-7}-10^{-9}$ Па. Эти масла представляют собой смесь фракций с различным давлением насыщенного пара и различной массой. С учетом этого в насосах предусмотрено фракционирование рабочей жидкости за счет многоступенчатой конструкции насоса. На рис. 2.1 а показана схема трехступенчатого насоса, для которого первая ступень является входной, а третья ступень – выходной. Входная ступень определяет предельное остаточное давление и быстроту действия насоса. Плотность струи пара в первой ступени должна быть малой для

обеспечения большой скорости диффузии газа в струю. Для выходной ступени, определяющей наибольшее выпускное давление насоса, давление пара рабочей жидкости должно быть возможно большим для получения струи высокой плотности. Фракционирование масла, стекающего в кипятильник по стенке корпуса, осуществляется с помощью лабиринтных колец (рис. 2.1 б). Легкие фракции масла, имеющие низкую температуру кипения, испаряются в наружном кольце лабиринта, и поступают в паропровод 3 (см. рис. 4.3 а). Тяжелые фракции, имеющие сравнительно высокую температуру кипения, испаряются во внутреннем кольце лабиринта и направляются в высоковакуумную ступень 1. Тяжелые фракции имеют низкое давление насыщенного пара и тем самым обеспечивают низкое предельное давление на входе насоса.

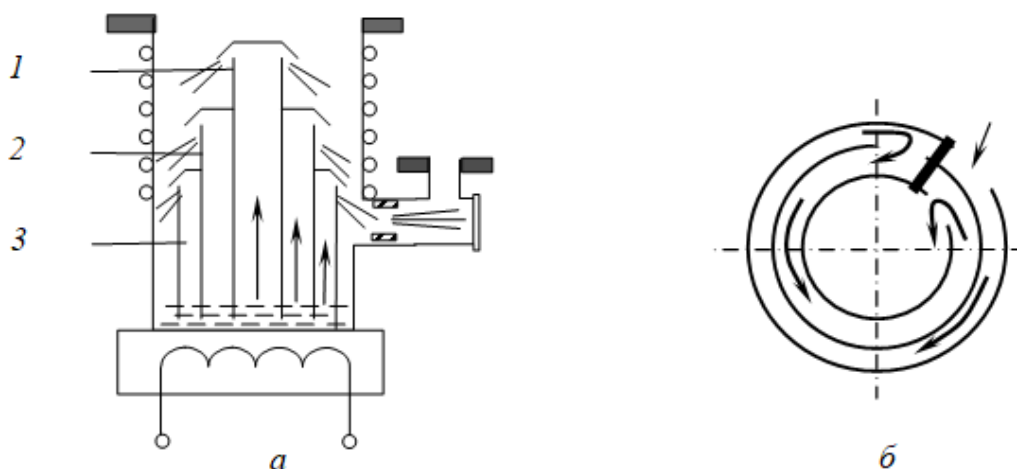


Рис. 2.1 Трехступенчатый паромасляный диффузионный насос: а – расположение паропроводов; б – система фракционирования; 1, 2, 3 – паропроводы

Основной характеристикой паромасляных диффузионных насосов является зависимость быстроты действия от давления на входе в насос (рис. 2.2). В средней области рабочих давлений II быстрота действия постоянна и равна $S_{\max}$. При приближении рабочего давления к предельному $p_{\text{пр}}$ (область I) она стремится к нулю из-за наличия обратного потока газов и паров из насоса в откачиваемый объем. При низких давлениях количество газа, откачиваемого насосом $Q_{\text{пр}}$ невелико, и соизмеримо с тем количеством газа, которое проникает в откачиваемый объем за счет натекания и газовыделения $Q_{\text{обр}}$. При увеличении рабочего давления за верхнюю границу молекулярного режима течения (область III) быстрота действия уменьшается в связи со снижением скорости диффузии молекул газа в струю пара и при максимальном входном давлении $p_{\text{пр}}$ стремится к нулю.

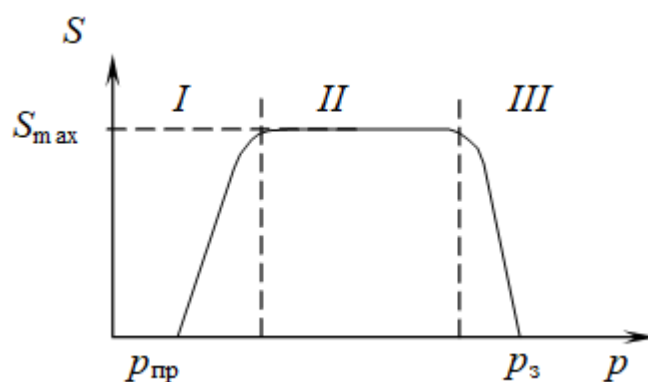


Рис. 2.2 Зависимость быстроты откачки паромасляного диффузионного насоса от впускного давления

Быстрота откачки зависит от мощности кипятильника, рода газа, температуры газа, рода рабочей жидкости. Мощность кипятильника определяет плотность и скорость струи пара. Механизм увлечения газа струей обусловлен двумя процессами: диффузией газа в струю, зависящей от плотности струи $\rho_{\text{п}}$, и переносом газа струей, зависящей от скорости струи $v_{\text{п}}$. Быстрота действия $S_{\text{н}}$ зависит от совокупности изменения этих параметров. Например, если увеличить $v_{\text{п}}$ при $\rho_{\text{п}} = \text{const}$ $S_{\text{н}}$ увеличивается, а если увеличить $\rho_{\text{п}}$ при $v_{\text{п}} = \text{const}$, то $S_{\text{н}}$ уменьшается. При одновременном увеличении $v_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{п}}$ максимум быстроты действия $S_{\text{н}}$ соответствует оптимальному соотношению $v_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{п}}$.

Зависимость быстроты откачки $S_{\text{н}}$ от рода газа описывается соотношением $\frac{S_1}{S_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$. Однако это соотношение без изменения мощности кипятильника не достигается. Для получения максимальной быстроты откачки по различным газам необходимо установить оптимальный режим подогрева для откачки каждого газа (рис. 2.3).

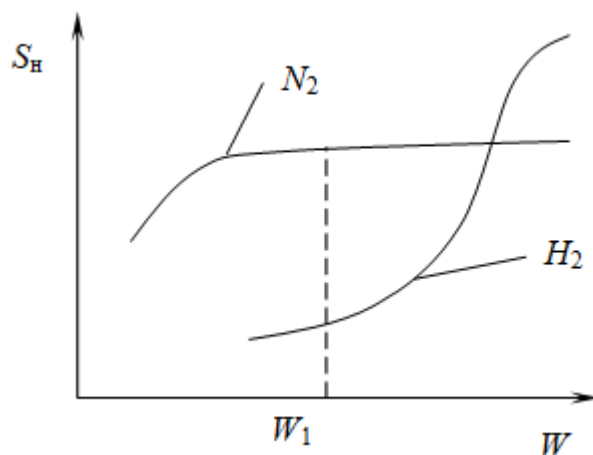


Рис. 2.3 Зависимость быстроты откачки от мощности кипятильника для разных газов

Например, при постоянной мощности W_1 азот откачивается с максимальной скоростью, а водород – практически не откачивается, что приводит на практике к селективности откачки.

Достоинства паромасляных диффузионных насосов: получение высокого вакуума, простота конструкции, большие скорости откачки.

Недостатки: селективность откачки, наличие паров масел в рабочем объеме и др.

Все паромасляные диффузионные насосы требуют предварительного разряжения и начинают работу с давления $p_3=(1-10)$ Па. Предельное давление насосов зависит от конструкции насосов, от степени охлаждения корпуса насоса, свойств рабочих жидкостей и т.п., и находится в интервале от 10^{-4} до 10^{-5} Па. При применении азотных ловушек на входе насоса предельное давление можно уменьшить на один-два порядка. Быстрота откачки в рабочем диапазоне давлений от 0,01 до 15 м³/с.

2.3 Методика выполнения работы

При выполнении работы необходимо определить предельное остаточное давление и исследовать влияние впускного давления на быстроту откачки насоса. Измерение быстроты откачки системы и быстроты действия насоса можно производить методом постоянного объема и методом постоянного давления. Обычно для паромасляных диффузионных насосов используется метод измерения быстроты откачки при постоянном давлении и контролируемом потоке газа в откачиваемый объем. В этом случае измерение быстроты откачки сводится к измерению потока газа в системе и давления в заданном сечении. В основе метода лежит постоянство потока откачиваемого газа в любом сечении вакуумной системы.

$$Q = S_1 p_1 = S_2 p_2 = S_n p_n = \text{const}$$

где индексы 1,2,...,n указывают на то, что значения быстроты откачки и давления относятся к 1,2,...,n-му сечению вакуумной системы.

Формула для вычисления быстроты откачки S имеет вид

$$S = \frac{Q}{p}$$

где Q – поток газа, поступающий в вакуумную систему и измеренный в любом месте его прохождения;

p – давление газа в сечении, в котором измеряется быстрота откачки.

Определение основных характеристик диффузионных насосов осуществляют на экспериментальной установке, схема которой показана на рис. 2.4. Для измерения быстроты откачки на испытуемый насос ND устанавливается измерительная вакуумная камера C . На измерительной камере устанавливаются тепловой PT и ионизационный PA вакуумметры и натекатель VF , соединенный вакуумным шлангом 1 с бюреткой 2 для измерения потока газа. Измерительная бюретка представляет собой стеклянную бюретку с припаянным к верхнему концу прямым краном K . При испытаниях верхний

конец бюретки соединяется вакуумным шлангом с натекателем, нижний опущен в стакан с маслом.

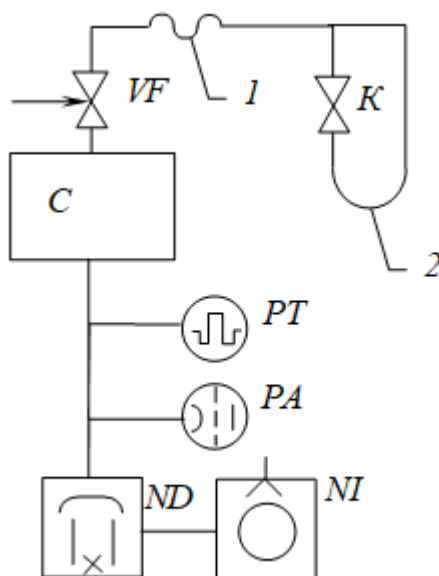


Рис. 2.4 Схема экспериментальной установки: *C* – камера измерительная; *PT* – вакуумметр тепловой; *PA* – вакуумметр ионизационный; *ND* – насос диффузионный; *NI* – насос вакуумный механический; *VF* – клапан регулировочный (натекатель); *K* - кран 1 – шланг вакуумный; 2 – бюретка измерительная

Измерение предельного остаточного давления производится в следующей последовательности. Запускаются насосы, и при установлении постоянного давления измеряется его величина. Измерения повторяются несколько раз и давление, которое не будет изменяться в течении длительного времени, считается предельным давлением.

Измерение быстроты откачки производят в следующей последовательности. Сначала достигается предельное давление в измерительной камере. Оно должно быть по крайней мере на порядок ниже того давления, при котором будет измеряться быстрота действия. Убеждаются в том, что краном *K* бюретка и натекатель соединены с атмосферой. В таком положении кран должен находиться всегда, за исключением момента измерения потока. С помощью натекателя *VF* устанавливают требуемое давление в камере *C*. Выбирают на шкале бюретки участок отсчета, удобный для наблюдения. Оба отсчетных уровня должны находиться в нижней части бюретки, и разность их должна составлять около десяти делений. Перекрывают кран на бюретке. При этом масло в бюретке начнет подниматься, восполняя убыль воздуха, поступающего в измерительную камеру через натекатель. Когда уровень масла в бюретке сравняется с нижним краем участка отсчета, включают секундомер. Когда уровень масла достигнет верхнего края участка отсчета, поднявшись на *n* делений, останавливают секундомер, фиксируя время *t* подъема масла на *n* делений, и открывают кран на бюретке (во избежание затягивания масла в измерительную камеру нельзя забывать открывать кран).

При измерениях быстроты откачки с помощью бюретки расчетная формула имеет вид:

$$S = \frac{K_{\delta} \cdot n}{p \cdot t}$$

где K_{δ} – коэффициент бюретки;

n – высота подъема столба масла за время t ;

p – давление газа в измерительной камере, при котором измеряется быстрота откачки.

Для получения воспроизводимых результатов измерения перед каждым следующим измерением дают возможность стечь маслу со стенок бюретки.

Измеренное значение быстроты откачки на данной экспериментальной установке относиться к рабочему объему, т.е. это будет S_0 .

2.4 Порядок выполнения работы

Изучить принцип действия и конструкцию паромасляного диффузионного насоса. Определить по справочнику основные параметры этого насоса: предельное давление, быстроту действия насоса, наибольшее давление запуска, наибольшее выпускное давление.

Ознакомиться с экспериментальной установкой и определить быстроту откачки вакуумной измерительной камеры. Рассчитать проводимость трубопроводов и коэффициент использования насоса.

2.5 Содержание отчета

В отчете необходимо представить:

- 1) схему насоса и принцип работы;
- 2) схему экспериментальной установки;
- 3) параметры насоса;
- 4) экспериментальные и расчетные значения быстроты откачки;
- 5) заключение по результатам экспериментов.

3. ТЕПЛОВЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

3.1 Цель работы

Изучить конструкцию манометрического преобразователя термопарного вакуумметра; экспериментально определить характеристики термопарного вакуумметра; изучить факторы, влияющие на чувствительность и диапазон рабочих давлений термопарного вакуумметра.

3.2 Основные теоретические положения

Принцип действия тепловых вакуумметров основан на зависимости теплопроводности разреженного газа от давления. Давление измеряют косвенным методом, т.е. измеряют какую-либо физическую величину, зависящую от тепловой энергии, отводимой газом от чувствительного элемента вследствие теплопроводности.

Манометрический преобразователь давления теплового вакуумметра представляет собой баллон, внутри которого расположен нагреваемый электрическим током чувствительный элемент (обычно нить). Величину теплопроводности можно определить по сопротивлению или по температуре нити. Температура нити обычно контролируется с помощью термопары. Эти две разновидности метода регистрации температуры определили и два основных вида тепловых вакуумметров: вакуумметры сопротивления и термопарные вакуумметры.

Количество тепла $Q_{\text{тепл}}$, переносимое за счет теплопроводности газа от тонкой металлической нити радиусом r_1 , нагретой до температуры T , к баллону радиусом r_2 , находящемуся при температуре окружающей среды T_0 , определится:

$$Q_{\text{тепл}} = K_z(T - T_0)F$$

где K_z – коэффициент теплопроводности газа;

F – площадь поверхности нити.

В области высоких давлений, когда длина пробега молекул газа между точками их соударений $\bar{\lambda}$ определяется только межмолекулярными взаимодействиями, теплопроводность газа не зависит от давления. Условием независимости теплопроводности газа от его давления будет неравенство $\bar{\lambda} \ll (r_2 - r_1)$. При низких же давлениях газа, когда $\bar{\lambda}$ становится больше $(r_2 - r_1)$, соударения молекул газа между собой отсутствуют и теплопроводность газа начинает зависеть от давления в объеме преобразователя давления. Коэффициент теплопроводности в этом случае пропорционален давлению и определяется:

$$K_z = \alpha \cdot A \cdot p = K_T \cdot p,$$

где α – коэффициент аккомодации, учитывающий меру обмена энергий между молекулами газа и нагретым телом, с которым они соударяются;

p – давление газа;

A – постоянная;

K_T – коэффициент, равный αA .

Рассмотрим пределы измерений давлений и чувствительность тепловых вакуумметров. На рис. 6.2 показаны зависимости теплопроводности газа Q и температуры нити T от давления газа. В области высоких давлений газа (область I) теплопроводность и температура нити перестает зависеть от давления газа. Верхний предел измеряемых давлений определяется условием $\lambda \ll r_1, \lambda \ll (r_2 - r_1)$.

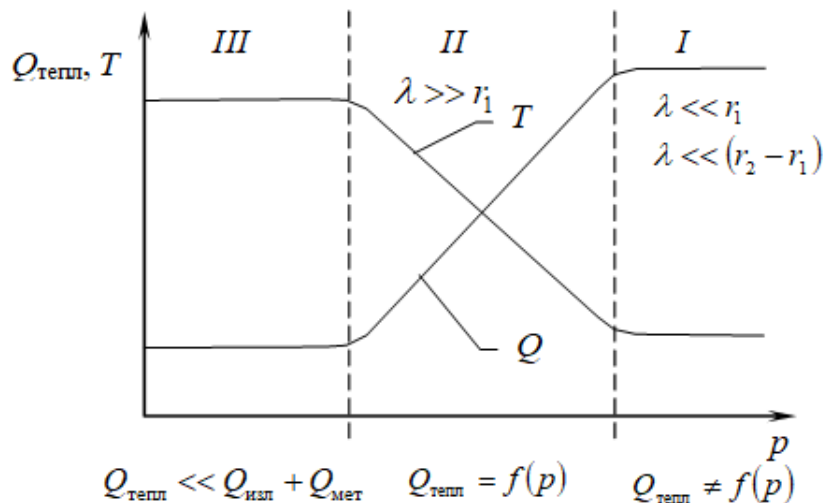


Рис. 3.1 Зависимости теплопроводности газа $Q_{\text{тепл}}$ и температуры нити T от давления газа

При давлениях, когда $\lambda \gg r_1$ зависимость теплопроводности газа от давления имеет линейный характер и тепловой вакуумметр обладает максимальной чувствительностью (область II). При малых давлениях (область III), когда отвод тепла от проволоки за счет теплопроводности газа становится соизмеримым с тепловыми потерями, т.е. $Q_{\text{тепл}} \leq Q_{\text{изл}} + Q_{\text{мет}}$ и температура проволоки будет определяется только величиной тепловых потерь, не зависящих от давления. Отсюда нижний предел измеряемых давлений можно определить из условия:

$$Q_{\text{тепл}} = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{мет}}.$$

Таким образом нижний предел измеряемых давлений будет определяться условием возможности регистрации потерь за счет теплопроводности $Q_{\text{тепл}}$ на фоне потерь за счет излучения, т.е. отношение $\frac{Q_{\text{тепл}}}{Q_{\text{изл}}}$ должно быть максимально. Доля тепла, теряемая за счет теплопроводности может быть определена с достаточной точностью, если она имеет порядок хотя бы 10-20% от величины $Q_{\text{изл}}$. В этом случае при $T_0=290$ К нижняя граница рабочей области будет определяться давлением порядка 10^{-1} Па.

Верхняя граница рабочей области тепловых вакуумметров определяется тем, что средняя длина пробега молекул становится соизмеримой с радиусом проволоки $\bar{\lambda} \approx r_1$. Если $r_1=0,1$ мм, то для воздуха при $T_0=290$ К, верхняя граница измерения тепловым вакуумметром будет $p_{\text{max}}=55$ Па. Применение более тонких проволок сдвигает верхнюю границу рабочей

области в сторону более высоких давлений. Смещение этой границы в сторону более высоких давлений может быть достигнуто для одной и той же проволоки также и за счет повышения тока накала.

Для определения пределов измерений теплового вакуумметра и его чувствительности необходимо рассмотреть уравнение теплового баланса. Чувствительность вакуумметра, равную по определению отношению приращения температуры нити к приращению давления dT/dp , для области линейной зависимости теплопроводности газа от давления можно вычислить дифференцированием по давлению основного уравнения теплового баланса.

Нить нагревается пропусканием тока. Если подводимую электрическую мощность поддерживать постоянной, то температура нити установится такой, что удовлетворится соотношение:

$$Q_{эл} = Q_{тепл} + Q_{изл} + Q_{мет}$$

где $Q_{эл}$ - подводимая мощность;

$Q_{тепл}$ - потери тепла путем теплопроводности газа;

$Q_{изл}$ - потери тепла путем теплового излучения;

$Q_{мет}$ - потери тепла путем отвода тепла по металлической проволоке к выводам.

Потери тепла за счет излучения:

$$Q_{изл} = K_{и}(T^4 - T_0^4)F,$$

где $K_{и}$ - коэффициент излучения материала нити;

T и T_0 - температура нити и баллона;

F - площадь поверхности нити.

Количество тепла, теряемое проволокой за счет теплоотвода через металлические выводы, будет:

$$Q_{мет} = K_{м}(T - T_0)S,$$

где $K_{м}$ - коэффициент теплопроводности материала нити;

S - площадь поперечного сечения нити.

Потери тепла за счет теплопроводности газа определяются по формуле (3.1):

$$Q_{тепл} = K_{г}(T - T_0)F,$$

Подводимая к нити мощность определится током накала I_n и сопротивлением нити R :

$$Q_{эл} = I_n^2 R.$$

При больших давлениях $Q_{тепл}$ не зависит от давления. Зависимость $Q_{г}$ от давления начинается, когда $\bar{\lambda}$ становится сравнимым с r_1 . Для $\bar{\lambda} \gg r_2$ отвод тепла через газ с понижением давления уменьшается и становится столь малым, что полный расход мощности практически определяется только излучением и отводом тепла к выводам, т.е. зависимость от давления становится исчезающе малой.

Измерительное уравнение теплового преобразователя с учетом формул (3.1), (3.3), (3.6), (3.7) можно записать

$$p = \frac{I_n^2 R - (Q_{\text{изл}} + Q_{\text{мет}})}{K_p (T - T_0) F}$$

Верхний предел давлений газа определяется из условия $\bar{\lambda} = r_1$. Длина свободного пробега молекул газа вычисляется по формуле

$$\bar{\lambda} = \frac{kT_z}{p\pi\sigma^2\sqrt{2}}$$

где k – постоянная Больцмана;
 T_z – температура окружающего нить газа;
 p – давление газа;
 σ – диаметр молекул газа.

Для воздуха при комнатной температуре газа при $r_1 = 0,1$ мм получается $p = 55$ Па. Повысить верхний предел измеряемых давлений можно, как видно из формулы (3.8), за счет увеличения тока накала нити.

Нижний предел давлений, измеряемых тепловыми вакуумметрами, определяется величиной потерь на излучения $Q_{\text{изл}}$ и отвод тепла по выводам $Q_{\text{мет}}$ из условия

$$\frac{Q_{\text{тепл}}}{Q_{\text{изл}} + Q_{\text{мет}}} \approx 1$$

Для уменьшения нижнего предела необходимо использовать длинные проволоки из материала с малой теплопроводностью. Это также уменьшает потери за счет теплоотвода к выводам, но увеличивает потери на излучение. В этом случае нижний предел измеряемых давлений будет определяться условием возможности регистрации потерь за счет теплопроводности $Q_{\text{тепл}}$ на фоне потерь за счет излучения $Q_{\text{изл}}$. Если принять реальную цифру $Q_{\text{тепл}}/Q_{\text{изл}} = 10 - 20\%$, то нижняя граница рабочей области будет определяться давлением порядка 10^{-1} Па.

Чувствительность вакуумметра dT/dp определяется дифференцированием по давлению основного уравнения теплового баланса (3.3). Чувствительность вакуумметра тем выше, чем больше разность температур $(T - T_0)$, т.е. чем ниже T_0 и выше температура проволоки. Кроме того следует использовать тонкую длинную проволоку из металла с большим объемным удельным сопротивлением.

3.3 Установка для исследования термопарного вакуумметра

Вакуумная установка предназначена для получения давления в диапазоне от 10^5 до 10^{-3} Па. Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 3.2. Вакуумная камера C откачивается с помощью двух насосов. В качестве насоса предварительного разрежения используется механический насос с масляным уплотнением NI , а для получения высокого вакуума – паромасляный диффузионный насос ND . Натекатель VF применяется для получения заданного давления газа в вакуумной системе. Контроль давления газа осуществляется жидкостным вакуумметром PL . Исследуемый преобразователь давления типа ПМТ-2 термопарного вакуумметра PT расположен в непосредственной близости от жидкостного вакуумметра.

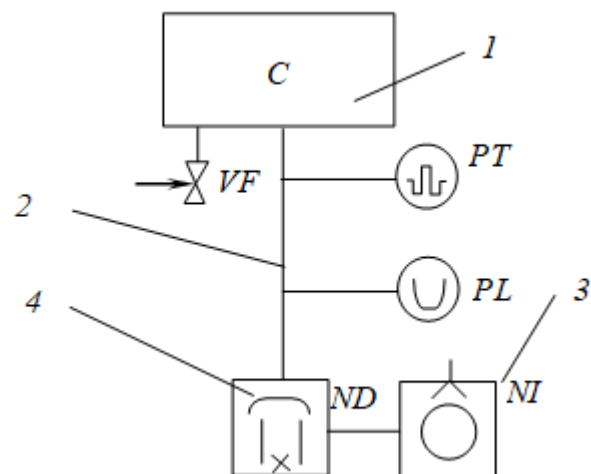


Рис. 3.2 Схема экспериментальной установки: 1 – камера вакуумная; 2 – трубопровод; 3 – механический вакуумный насос; 4 – диффузионный вакуумный насос *PT*, *PL* – вакуумметры

В термопарном преобразователе температура нити измеряется термопарой. Если ток накал нити поддерживается постоянным, то термо-э.д.с. термопарного преобразователя будет определяться давлением окружающего газа. Измеряя давление с помощью жидкостного вакуумметра, можно получить зависимость термо-э.д.с. U от давления $U = f(p)$ и определить чувствительность термопарного вакуумметра как $\Delta U / \Delta p$.

Посредством жидкостных манометров измеряют давления постоянных (неконденсирующихся) газов, для повышения чувствительности измерений газ при этом предварительно подвергают сжатию. Если, например, занимаемый газом при некотором неизвестном давлении объем 100 см^3 уменьшить каким-либо образом до $0,1 \text{ см}^3$, то давление газа, а значит, и отсчет манометра повысится в 1000 раз.

Схема жидкостного компрессионного манометра представлена на рис.3.3. В качестве рабочей жидкости используется вакуумное масло.

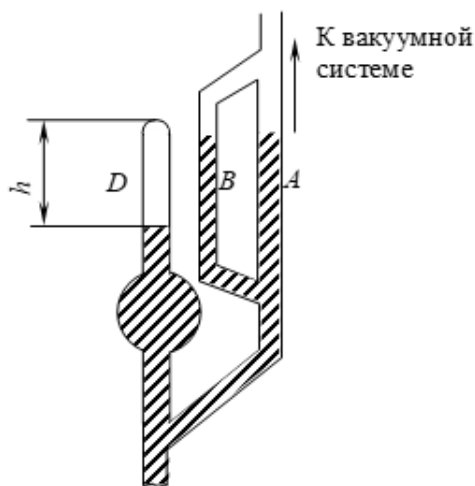


Рис. 3.3 Жидкостной компрессионный манометр с квадратичной шкалой

Воспользовавшись законом Бойля-Мариотта, можно записать:

$$pV = (p + h) \cdot V_{\kappa}$$

где V – суммарный объем шара и мерного капилляра;

V_{κ} – объем мерного капилляра D от уровня масла до верха капилляра;

h – разность уровней масла в мерном (закрытом) капилляре и в капилляре сравнения B (открытом).

Из уравнения (3.9) следует:

$$p = h \frac{V_{\kappa}}{(V - V_{\kappa})}$$

и для $V_{\kappa} \ll V$ получается измерительное уравнение для компрессионного манометра с линейной шкалой:

$$p = h \frac{V_{\kappa}}{V};$$

Если вершину мениска в капилляре сравнения B установить на уровне верхушки мерного капилляра D , то получим измерительное уравнение для манометра с квадратичной шкалой. Для цилиндрического капилляра:

$$V_{\kappa} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h,$$

где d – диаметр капилляра.

Тогда имеем:

$$p = \frac{1}{V_{\kappa}} h \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h = h^2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4V_{\kappa}},$$

где объем шара радиусом R рассчитывается, как

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3.$$

В экспериментальной работе используется жидкостный манометр со следующими размерами: диаметр капилляра 2 мм, максимальная высота подъема – $h_{\max} = 100$ мм, диаметр шара 30 мм.

3.4 Методика выполнения работы

1) Определить значение рабочего тока для термопарного преобразователя давления ПМТ-2. Определить значения рабочих токов можно, если в вакуумной системе, к которой присоединен преобразователь, достигнуто давление ниже 10^{-2} Па. В связи с этим необходимо давление в этой части вакуумной системы понизить с помощью диффузионного насоса ND (рис. 3.1).

Произвести измерения в соответствии с инструкцией по работе с термопарным вакуумметром.

2) Определить зависимость термо-э.д.с. U преобразователя ПМТ-2 от давления газа p :

- установить выбранную величину тока накала;

- установить по жидкостному вакуумметру PL необходимую величину давления в вакуумной системе с помощью натекателя VF . Изменять давление в вакуумной системе следует в диапазоне, который можно измерить с помощью жидкостного манометра (предварительно этот диапазон рассчитать для указанных размеров манометра)

- снять отсчет величин термо-э.д.с.;
- построить зависимости $U = f(p)$ и определить чувствительность термопарного преобразователя $\Delta U / \Delta p$.

3) Определить диапазон рабочих давлений для термопарного преобразователя ПМТ-2.

3.5 Содержание отчета

- 1) Эскиз термопарного преобразователя давления ПМТ-2.
- 2) Схема вакуумной установки.
- 3) Экспериментальные зависимости $U = f(p)$ и значения чувствительности.
- 4) Выводы о диапазоне рабочих давлений.

4. ВАКУУМНЫЕ НАПЫЛИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

4.1 Цель работы

Изучить вакуумную напылительную установку УВН-2М; изучить инструкции по эксплуатации термопарных и ионизационных вакуумметров; выполнить индивидуальное задание по работе на установке.

4.2 Методические указания по эксплуатации установки УВН-2М

4.2.1 Принцип работы.

Схема экспериментальной установки представлена на рис.4.1.

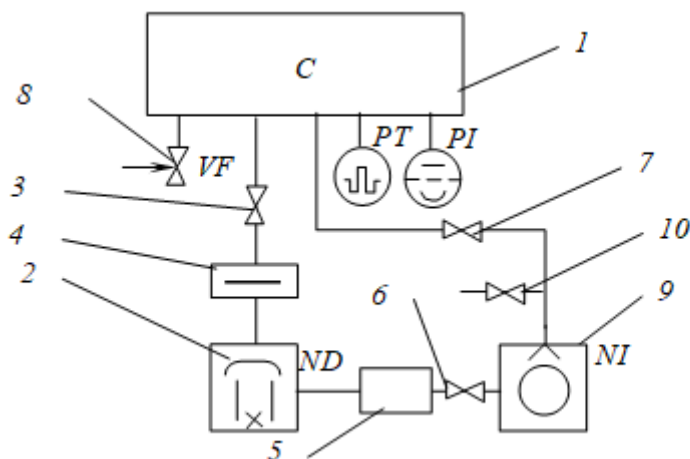


Рис. 3.2 Схема экспериментальной установки: 1 – камера вакуумная; 2 – трубопровод;
3 – механический вакуумный насос; 4 – диффузионный вакуумный насос;
PT, PL – вакуумметры

В рабочем объеме 1 высокий вакуум создается насосом 2, который подсоединяется к объему через вентиль 3 (вакуумный затвор) и ловушку 4. Ловушка чаще всего охлаждается азотом и снижает обратный поток паров рабочей жидкости (масла) из высоковакуумного насоса в откачиваемый объем 1. Насос 9 обеспечивает получение предварительного разряжения, и подключается к высоковакуумному насосу 2 через вентиль 6. Клапан 10 применяется для напуска атмосферного воздуха в механический насос во время его остановки, чтобы предотвратить попадание рабочей жидкости форвакуумного насоса в высоковакуумный насос.

В типовой вакуумной системе предусмотрены две линии откачки: основная для получения высокого вакуума в технологическом объеме и вспомогательная для предварительной откачки перед включением основной линии. Основная линия откачки: рабочий объем 1 – открытый затвор 3 – ловушка 4 – высоковакуумный насос 2 – форбаллон 5 – открытый вентиль 6 – форвакуумный насос 9 (вентиль 7 - закрыт). После проведения технологического процесса необходимо произвести напуск атмосферы в рабочий объем 1 через натекаль 8. С этой целью предварительно необходимо отключить вакуумную систему от технологического объема, перекрыв затвор 3.

После загрузки рабочего объема в нем необходимо создать предварительное разрежение, что делается с помощью вспомогательной линии. С этой целью закрываем натекабель 8, и вентиль 6, а вентиль 7 открываем. Вспомогательная линия откачки: рабочий объем 1 – открытый вентиль 7 – форвакуумный насос 9. На момент работы вспомогательной линии функцию форвакуумного насоса для высоковакуумного насоса выполняет форбаллон 5. По вспомогательной линии рабочий объем откачивается до давления, достаточного для запуска высоковакуумного насоса. При достижении этого давления, необходимо последовательно закрыть вентиль 7, открыть вентиль 6, а затем открыть затвор 3 и продолжать откачивать объем по основной линии откачки.

Форвакуумный насос типа ВН-461М предназначен для получения низкого вакуума до 1 Па. Высокий вакуум обеспечивается с помощью паромасляного диффузионного насоса. Особенность работы диффузионного паромасляного насоса заключается в том, что перед его включением необходимо во всей системе создать вакуум ниже 10 Па, а во время его работы форвакуумный насос должен производить непрерывную откачку. Для нормальной работы диффузионный насос во время откачки охлаждается водой. Нагреватель насоса включается только после подачи воды.

ВНИМАНИЕ! Во время работы диффузионного насоса нельзя допускать напуска атмосферного воздуха в рабочий объем при открытом затворе, так как при этом масло окисляется и теряет вакуумные свойства.

4.2.2. Измерение низких давлений газа.

Для измерения низких давлений вакуумная техника использует несколько типов манометров, действие которых основано на различных физических принципах. Остановимся только на тех, которые используются в лаборатории. Вакуумметр ионизационно-термопарный типа ВИТ-1А представляет собой комбинированную измерительную установку, состоящую из ионизационной манометрической лампы типа ЛМ-2, термопарных манометрических ламп типа ЛТ-2 и ЛТ-4М и измерительного блока.

Термопарные манометры применяются для измерения давлений разреженных газов в интервале от 100 Па до 10^{-1} Па. Действие этих манометров основано на зависимости теплопроводности газа от его плотности, т.е. от количества молекул в единице объема, способных своим движением переносить тепло. Если в откачиваемый объем поместить нагретую длинную металлическую нить, то отвод тепла от нее к холодным стенкам сосуда будет в значительной мере определяться теплопроводностью окружающего нити газа. Схема термопарного вакуумметра представлена на рис.4.2.

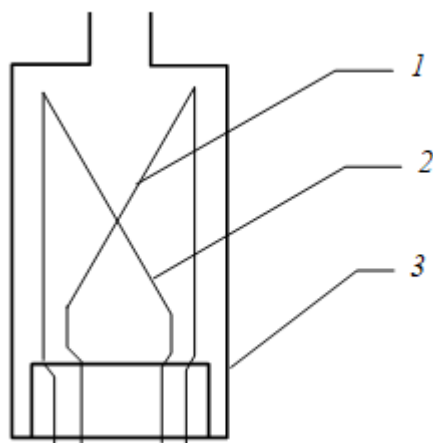


Рис.4.2 Схема термопарного вакуумметра: 1 – нагреватель; 2 – термопара; 3 корпус

В данном манометре термопара 2 своим спаем приварена к нагревателю 1. При неизменном токе накала нагревателя в результате изменения давления меняется температура спая, следовательно, и термо-э.д.с., по величине которой судят о давлении. На протяжении всей работы ток нагревателя должен поддерживаться неизменным.

Для того, чтобы по величине термо-э.д.с. судить о давлении в системе, необходимо пользоваться градуировочной кривой (рис.4.3.). Максимальная термо-э.д.с., развиваемая термопарой, равна 10 мВ, что соответствует давлению $1 \cdot 10^{-2}$ Па.

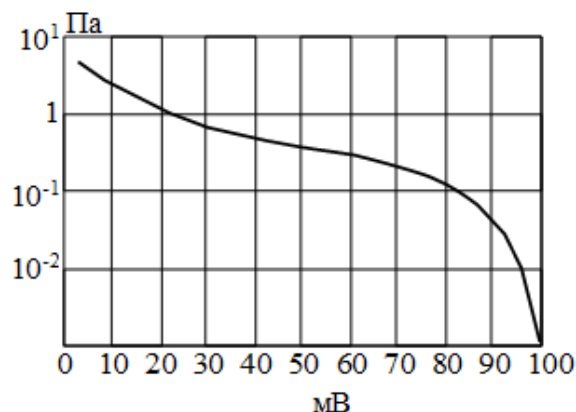


Рис.4.3 Градуировочная кривая термопарного вакуумметра

ВНИМАНИЕ! Перед включением вакуумметра необходимо убедиться, что накал ионизационной лампы ЛМ-2 выключен.

Измерение давления с термопарной лампой ЛТ-2 производится следующим образом. Поставить переключатель «Ток накала – Измерение» в положение «Ток накала» и реостатом «Регулировка тока накала» установить рабочий ток нагревателя данной термопарной лампы. Поставить переключатель «Ток накала – Измерение» в положение «Измерение» и сделать отсчет в милливольты. Затем этот отсчет перевести в единицы давления (мм рт.ст.) по градуировочной кривой термопарной лампы ЛТ-2 или ЛТ-4М.

Ионизационные манометры применяются для измерения давления газов в диапазоне $10^{-1} - 10^{-5}$ Па. Конструкция ионизационного манометра напоминает устройство электронной лампы (рис. 4.4, а)

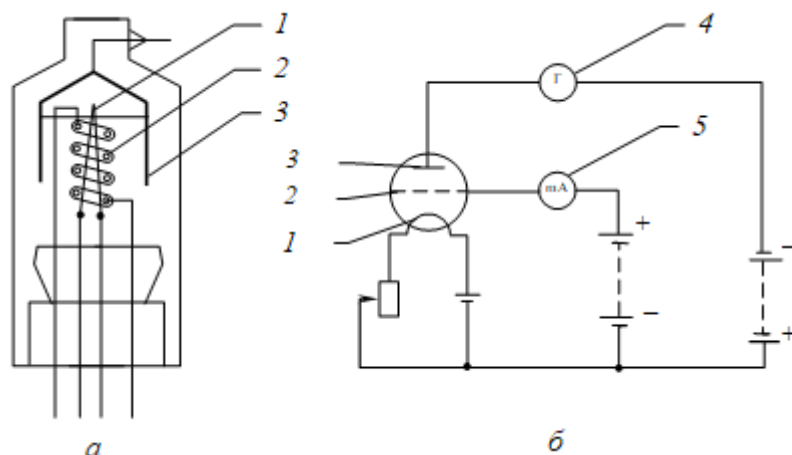


Рис. 4.4 Ионизационный манометр: а – внешний вид, б – схема включения
1 – термокатод; 2 – сетка; 3 – коллектор ионов; 4 – гальвонометр; 5 - миллиамперметр

Накальный катод 1 эмиттирует электроны, которые ускоряются положительным напряжением сетки 2. Электроны, пролетающие через редкие витки сетки, отталкиваются отрицательно заряженным коллектором 3. Совершая колебательные движения около сетки, электроны сталкиваются с атомами и молекулами газа, ионизуют их и в конце концов попадают на сетку. Положительные ионы притягиваются отрицательно заряженным коллектором. Число образовавшихся ионов пропорционально плотности газа. Поэтому ток в цепи коллектора пропорционален давлению в системе, к которой присоединен баллон манометрической лампы. На рис. 4.4, б представлена упрощенная схема включения измерительного блока.

Перед включением ионизационной части вакуумметра необходимо убедиться с помощью термопарного манометра, что давление в рабочей камере не выше 10^{-1} Па.

ВНИМАНИЕ! Включение ионизационной манометрической лампы ЛМ-2 при давлении выше 10^{-1} Па может привести к преждевременному выходу ее из строя.

Измерения с ионизационным манометром производить следующим образом:

1. Поставить правый верхний переключатель в положение «Прогрев», средний переключатель под прибором – в положение «Установка нуля», переключатель под прибором М24-206 – в положение «Эмиссия».

2. Включить сеть переключателем «Сеть 220 В» и прогреть прибор в течение 2-3 минут.

3. Отрегулировать усилитель ионного тока. Для этого необходимо поставить переключатель под прибором вакуумметра ионизационного в положение «Измерение», переключатель множителя

шкалы – в положение «Установка нуля» и потенциометром «Регулировка нуля» установить стрелку измерительного прибора на нуль шкалы.

4. Термопарной частью вакуумметра проверить давление в откачиваемой системе. Если давление ниже 10^{-1} Па, то можно подготовить ионизационную часть вакуумметра к измерению давления. Для этого необходимо поставить переключатель «Множитель шкалы» положение « 10^{-4} », переключатель под прибором – в положение «Эмиссия».

5. Переключателем «Накал» включить накал ионизационной манометрической лампы ЛМ-2.

6. После прогрева сетки ионизационной манометрической лампы в течении 10-15 минут надо правильно установить ток эмиссии ионизационной манометрической лампы, для этого необходимо верхний правый переключатель перевести из положения «Прогрев» в положение «Измерение» и потенциометром «Установка эмиссии» перевести стрелку прибора на 50 мкА.

7. Перевести переключатель в положение «Измерения», установить стрелку ручкой потенциометра «Установка нуля» в нулевое положение.

8. Установить переключатель в положение соответствующее давлению в вакуумной камере, при котором отсчет по измерительному прибору будет лежать в пределах от 10 до 100% шкалы.

4.2.3. Методические указания по эксплуатации установки УВН-2М

К работе на установке допускаются только те студенты, которые прошли инструктаж и расписались в журнале по ТБ.

Проверку электрической цепи можно производить только при отключенной установке в присутствии преподавателя.

Запуск установки:

1. Включить воду. В надежности включения убедиться по интенсивности вытекания воды из сливного шланга.

2. Тумблер «Сеть» повернуть в положение «вкл.»

3. Проверить, что все линии откачки перекрыты.

4. Тумблер «Форвакуумный насос» нажать в положение «вкл.»

5. Тумблер «Холодная вода» нажать в положение «вкл.»

6. Открыть вентиль 6, и тумблер «Диффузионный насос» в положение «вкл.»

Откачка рабочего объема:

1. Перекрыть вентиль 6, открыть вентиль 7.

2. При достижении давления в рабочем объеме ниже 10^1 Па (красная черта на шкале вакуумметра). перекрыть вентиль 7 и открыть вентиль 6.

3. Открыть затвор.

Напуск в рабочий объем атмосферы:

1. Закрыть затвор.

2. Открыть натекаТЕЛЬ 8.

4.3 Индивидуальные задания

Необходимо составить последовательность операций при выполнении индивидуального задания (техмаршрут).

ЗАДАНИЕ №1

Необходимо установить подложки и испарители в рабочей камере, произвести напыление.

Исходное состояние установки: в рабочей камере – высокий вакуум, работают оба насоса, откачка по основной линии.

ЗАДАНИЕ №2

Необходимо получить в рабочем объеме высокий вакуум, произвести напыление и извлечь подложки из камеры.

Исходное состояние установки: откачка производится по вспомогательной линии, оба насоса включены, в рабочем объеме – предварительное разряжение.

ЗАДАНИЕ №3

Необходимо загрузить подложки и установить испарители, произвести напыление в высоком вакууме.

Исходное состояние установки: установка выключена, насосы не работают.

ЗАДАНИЕ №4

Необходимо произвести напыление в высоком вакууме и извлечь подложки.

Исходное состояние установки: откачка производится по основной линии откачки с открытым вакуумным затвором, высоковакуумный насос не работает.

ЗАДАНИЕ №5

Необходимо установить подложки и испарители и произвести напыление в высоком вакууме.

Исходное состояние установки: откачка по основной линии с закрытым вакуумным затвором, работают оба насоса.

ЗАДАНИЕ №6

Необходимо произвести напыление и извлечь подложки из рабочей камеры.

Исходное состояние установки: откачка по вспомогательной линии, высоковакуумный насос не работает.

ЗАДАНИЕ №7

Необходимо произвести напыление пленок и извлечь подложки.

Исходное состояние установки: в рабочем объеме – предварительное разряжение, откачка по вспомогательной линии, высоковакуумный насос не работает.

ЗАДАНИЕ №8

Выключение вакуумной установки без развакуумирования рабочего объема.

Исходное состояние установки: в рабочем объеме – высокий вакуум, работают оба насоса.

4.4 Порядок выполнения работы

1) Изучить устройство вакуумной напылительной установки УВН-2М с указанием конкретных типов насосов и датчиков давления.

2) Составить последовательность технологических операций в соответствии с индивидуальным заданием и получить допуск у преподавателя. На каждой операции следует указывать давление газа и время откачки.

4.5 Содержание отчета

В отчете необходимо представить:

1) Схему установки УВН-2М.

2) Параметры насосов.

3) Техмаршрут в соответствии с индивидуальным заданием.

4) Параметры установки УВН-2М, которые были получены в экспериментах.