

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. Королёва

*Изучение установки тонкоплёночного  
напыления материалов*

*Методическое указание к лабораторной работе*

Самара 2007

Составители: *М.Н. Пиганов, В. Д. Дмитриев, А.В. Архипов.*

**УДК 621.38(075)**

**Изучение установки тонкоплёночного напыления материалов:**  
Методические указания к лабораторной работе / Самарский  
государственный аэрокосмический, университет. Сост. *Пиганов М.Н.,  
Дмитриев В.Д., Архипов А.В.* – Самара, 2007 – 28 с.

Приводятся сведения о методах удаления газа из откачиваемого объема и измерения степени вакуума. Описаны конструкции и принцип работы вакуумной установки и основных приборов измерения степени вакуума.

Рекомендуются студентам очной, вечерней и заочной формы обучения специальности 210201 при изучении дисциплин «Технологические основы микроэлектроники» и «Технология микросборок». Подготовлены на кафедре КиПРЭС.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.

Рецензент *Г.П. Шопин.*

**Цель работы:** изучение техники получения и измерения вакуума, напыления различных материалов; приобретение практических навыков в обращении с вакуумной установкой типа УВН и с основными приборами измерения вакуума.

**Задания:**

1. Изучить принцип работы вакуумной установки и методы измерения низкого и высокого вакуума согласно описанию и инструкции по эксплуатации вакуумметра типа ВИТ-1 А.
2. Снять зависимость изменения давления от времени в процессе откачки, и после отключения диффузионного насоса.
3. Напылить на поверхность подложки проводящий или резистивный материал при заданных режимах.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### Условия для вакуумного термического осаждения материалов

Вакуумом называется состояние газа, имеющего плотность меньшую, чем его плотность при нормальных физических условиях. Степень вакуума может характеризоваться средней длиной свободного пробега молекул. Длиной свободного пробега называется путь, проходимый молекулой от одного столкновения до следующего. Вследствие хаотичности молекулярного движения величина свободных пробегов постоянно меняется. Неизменным при данных условиях остается лишь их среднее значение, называемое средней длиной свободного пробега молекул газа  $\lambda$ , см:

$$\lambda = \frac{\kappa T}{\pi \sqrt{2} p_0 \delta^2}$$

где  $\kappa = 1,03 \cdot 10^{-19}$  мм рт. ст. см<sup>3</sup>/К,

$\kappa$  – постоянная Больцмана,

$T$  – абсолютная температура газа,

$\delta$  – эффективный диаметр молекул газа, см.

При постоянной температуре ( $T=\text{const}$ ) по мере разрежения газа, т.е. уменьшения его давления  $P$ , средняя длина свободного пробега возрастает так, что  $\lambda P = \text{const}$ .

В вакуумной технике за единицу давления принято 133 Па. Зависимость средней длины свободного пробега молекул от степени давления газа приведена в табл. 1.

**Таблица 1 – Зависимость средней длины свободного пробега молекул от степени давления газа**

Давление, Па	133·760	13,3	1,33	0,133	0,0133	0,00133	0,000133
Давление, мм рт.ст.	760	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
$\lambda$ , см	$7,2 \cdot 10^{-6}$	0,0547	0,547	5,47	54,7	547	5470

Переходя к рассмотрению вакуумной технологии, в зависимости от соотношения между средней длиной свободного пробега молекул и расстоянием «а» между испарителем и подложкой, различают:

- высокий вакуум при  $\lambda \gg a$ ,
- средний вакуум при  $\lambda > a$ ,
- низкий вакуум при  $\lambda < a$ .

Учитывая, что реальные расстояния от испарителя до подложки в производственных вакуумных установках не превышают 30 см, для среднего вакуума давление остаточного газа должно быть не более  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па.

Для повышения чистоты осаждаемой плёнки (отсутствие химического взаимодействия с остаточными газами и адсорбции их растущей плёнкой) требуется более глубокий вакуум. Однако давление заметно снижает экономичность процесса вакуумного напыления и его эффективность в целом. Экономичным для производственных условий является вакуум  $1,3 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-5}$  Па, который достигается относительно простыми средствами, а именно с помощью форвакуумного насоса, включённого последовательно с диффузионным паромасляным насосом. Поскольку время откачки достигает 1 - 1,5 часа, процесс вакуумного напыления может быть эффективным лишь при обработке большого количества подложек (последовательно или одновременно) за один вакуумный цикл. Поэтому производственные вакуумные установки всегда являются многопозиционными.

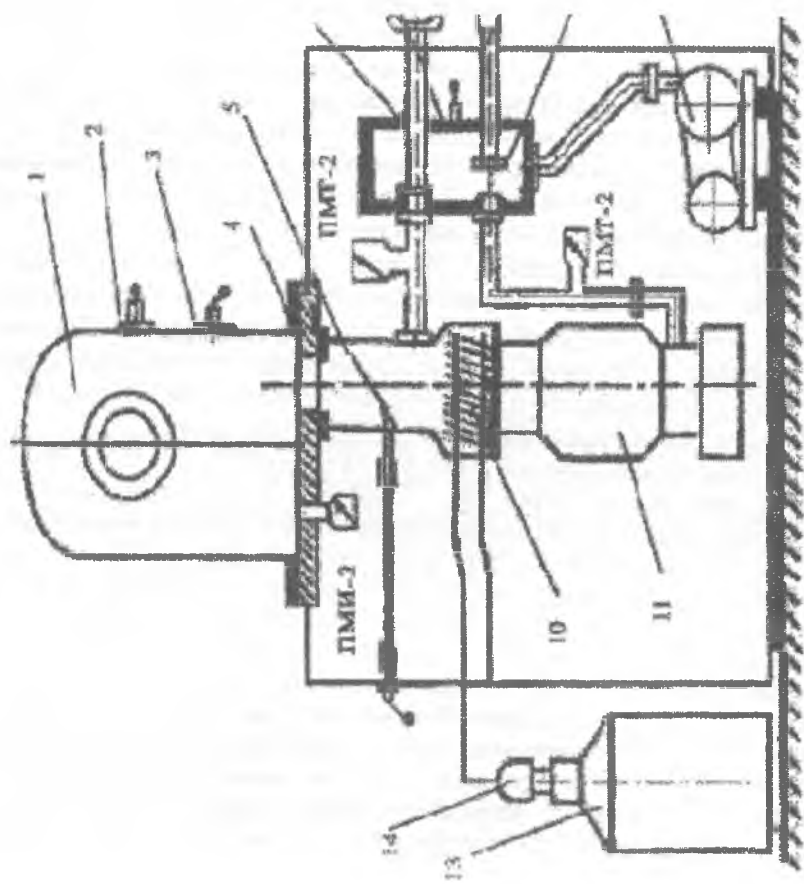


Рисунок 1 - Схема вакуумной установки

## Схема и принцип работы вакуумной установки серии УВН

Установки вакуумного напыления (УВН) в производстве гибридных интегральных микросхем используются для нанесения тонких пленок различных материалов (проводящих, резистивных и диэлектрических). Типовая схема вакуумной установки серии УВН, приведенная на рис. 1, содержит следующие элементы и узлы: рабочую камеру 1, вентиль-натекатель 2, натекатель 3, базовую плиту 4, затвор 5, клапан 6, вентиль-натекатель 7, клапан 8, клапанную коробку 9, азотную ловушку 10, паромасляный диффузионный насос 11, механический вращательный насос 12, сосуд Дьюара 13 с азотным питателем 14.

В качестве основного средства откачки используется паромасляный диффузионный насос типа Н-2Т. Для предварительной откачки вакуумной системы служит механический вращательный насос типа ВН-7Г. Для предотвращения попадания в рабочую камеру 1 паров масла из диффузионного насоса на впускной фланец последнего устанавливается азотная ловушка, питаемая от выносного сосуда Дьюара. Различные переключения в вакуумной системе осуществляются с помощью клапанной коробки с клапанами 6 и 8, а также высоковакуумным затвором 5.

Игольчатый вентиль-натекатель 2 служит для дозированной подачи какого-либо газа в рабочую камеру 1, а натекатель 3 — для напуска воздуха под колпак перед его подъемом. Вентиль-натекатель 7 с электромагнитным приводом предназначен для напуска атмосферного воздуха в механический насос после его остановки и при закрытых клапанах 6 и 8. Для измерения давления в различных участках вакуумной системы установлены манометрические лампы: две термпарные — на трубопроводах, соединяющих клапанную коробку с диффузионным насосом и рабочей камерой, ионизационная — на базовой плите 4 непосредственно под колпаком. Вакуумметр типа ВИТ-1-А, к которому подключены манометрические лампы, установлен на пульте управления установки. При работе всех средств откачки, включая азотную ловушку, под колпаком рабочей камеры установки может быть достигнут предельный вакуум  $665 \cdot 10^{-7}$  Па. Время достижения предельного вакуума не более 90 мин.

### Последовательность переключений вакуумной установки

Чрезвычайно важно соблюдать определенную последовательность переключений в вакуумной системе установки. До включения электропитания установки перед началом работы следует закрыть все вентили, клапаны и затвор, если они были открыты, и только после этого

включить рубильник электропитания. Откачку рабочей камеры установки необходимо производить в следующем порядке:

включить механический насос, открыть клапан 8, включить термомпарный вакуумметр и откачать рабочий объем паромасляного насоса до давления 1 Па;

включить систему водяного охлаждения и электронагреватель паромасляного насоса и прогреть в течение 10 мин;

предварительно откачать рабочую камеру установки механическим насосом, для чего следует закрыть клапан 8, открыть клапан 6 и, откачав рабочую камеру до давления 1 Па, снова переключить клапаны в прежнее положение;

открыть затвор, включить азотный питатель для подачи азота в ловушку, включить ионизационный вакуумметр на прогрев и через 10 мин переключить его на измерение вакуума, предварительно откалибровав. Откачка рабочей камеры паромасляным насосом и измерение давления в ней производится в течение всего процесса осаждения пленок, включая нагрев и охлаждение подложек.

После окончания технологического процесса осаждения пленок необходимо закрыть затвор, переключить азотный питатель на прогрев ловушки, выключить ионизационный вакуумметр. Затем можно открыть вентиль-натекатель 3 и, заполнив рабочую камеру атмосферным воздухом, поднять колпак с помощью гидропривода. Для выключения установки нужно сначала выключить электронагреватель паромасляного насоса и после его остывания в течение 40-60 мин закрыть клапан 8 и выключить механический насос. После этого следует напустить воздух в механический насос через натекатель 7, а затем выключить рубильник электропитания установки.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** иногда в производственных условиях происходит аварийное выключение электропитания. В этом случае необходимо прежде всего закрыть клапан 6, открытый в момент аварии, напустить воздух в механический насос через натекатель 7, закрыть затвор 5, если он открыт, и затем выключить общий рубильник и все выключатели электропитания на пульте управления установки и вакуумметре.

При аварийном прорыве атмосферы под колпак в момент откачки рабочей камеры паромасляным насосом необходимо прежде всего закрыть затвор, а затем действовать так же, как и в предыдущем случае.

### **Классификация вакуумных установок для осаждения материалов**

Применяемые в производстве микросхем вакуумные установки для получения тонких пленок классифицируют по следующим

признакам:

- по степени предельного вакуума, достижимого в рабочей камере установки;
- по числу операций осаждения тонкопленочных слоев, производимых за один вакуумный цикл;
- по месту и источнику образования пленок.

По первому признаку различают высоковакуумные и сверхвысоковакуумные установки, по второму — однооперационные и многооперационные и по третьему – установки термического испарения материалов в вакууме с помощью резистивных и электронных испарителей, установки катодного и ионно-плазменного распыления, а также установки для полимеризации в высокочастотном разряде. Обычно в одной установке реализуется несколько классификационных признаков. Так, например, высоковакуумные и сверхвысоковакуумные установки серии УВН могут быть как однооперационными, так и многооперационными, а по методу формирования пленок сверхвысоковакуумные установки могут предназначаться только для термического испарения, так как для катодного и ионно-плазменного распыления, а также для полимеризации в высокочастотном разряде сверхвысокий вакуум не нужен.

### Система обозначений установок серии УВН

Обозначения установок, выполненных на основе базовой модели УВН-2М, отличаются друг от друга индексацией моделей. Расшифровка системы обозначений (индексации) вакуумных установок серии УВН дана в табл. 2. Например, установка с предельным вакуумом  $665 \cdot 10^{-7}$  Па, с резистивным испарителем и ручным управлением, являющаяся первой моделью данного типа, имеет индекс УВН-71Р-1. В производстве тонкопленочных интегральных микросхем применяют вакуумные установки типа УВН-71Р-1, УВН-71П-2, УВН-73П-1, УВН-75Р-1, УВН-61П-1, УВН-62П-2 и т.д.

Лабораторная работа проводится на вакуумной установке типа УВН-2М-1, предназначенной для серийного производства многослойных пленочных микросхем. По классификационным признакам УВН-2М-1 является высоковакуумной многооперационной установкой и позволяет наносить пленки методом термического испарения с помощью резистивных и электронного испарителей. Схема ее внутрикамерного устройства показана на рисунке 2. На базовой плите 1 равномерно по окружности расположено шесть позиций испарения, на пяти из которых установлены резистивные испарители 3, на шестой – электронный испаритель 12. Каждая из позиций испарения изолирована от других быстросъемными экранами 4.

На расстоянии 300 мм от испарителей на неподвижном диске

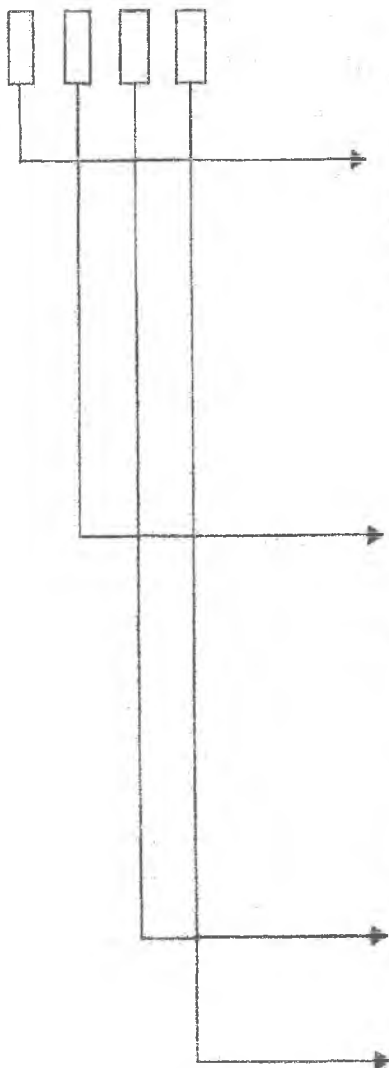


Таблица 2 – Система обозначений вакуумных установок серии УВН.

Индекс установки

Расшифровка индексов

УВН



Пределный вакуум, Па:

2 –  $133 \cdot 10^{-2}$

3 –  $133 \cdot 10^{-3}$

4 –  $133 \cdot 10^{-4}$

и т.д.

Метод и источник образования пленок:

0 – базовая модель

1 – резистивный испаритель

2 – катодное и ионно-плазменное распыление

3 – электронный испаритель

4 – резистивный и электронный испаритель

5 – ионно-плазменное распыление и электронный испаритель

6 – ионно-плазменное распыление и резистивный испаритель

7 – электронный испаритель и полимеризация в ВЧ-разряде

Тип управления:

Р – ручное

П – полуавтоматическое

А – автоматическое

Порядковый номер модели

6 установлено шесть масок, каждая против одной из позиций испарения. Над диском с масками расположена шестипозиционная карусель подложек 7, которая с помощью привода 2 может перемещаться по вертикали и поворачиваться вокруг оси вращения с фиксацией через каждые  $60^\circ$ . Такое сложное движение позволяет совмещать подложки с масками и поочередно менять подложки относительно позиций испарения, за счет чего на установке возможно нанесение шестислойных схем за один вакуумный цикл.

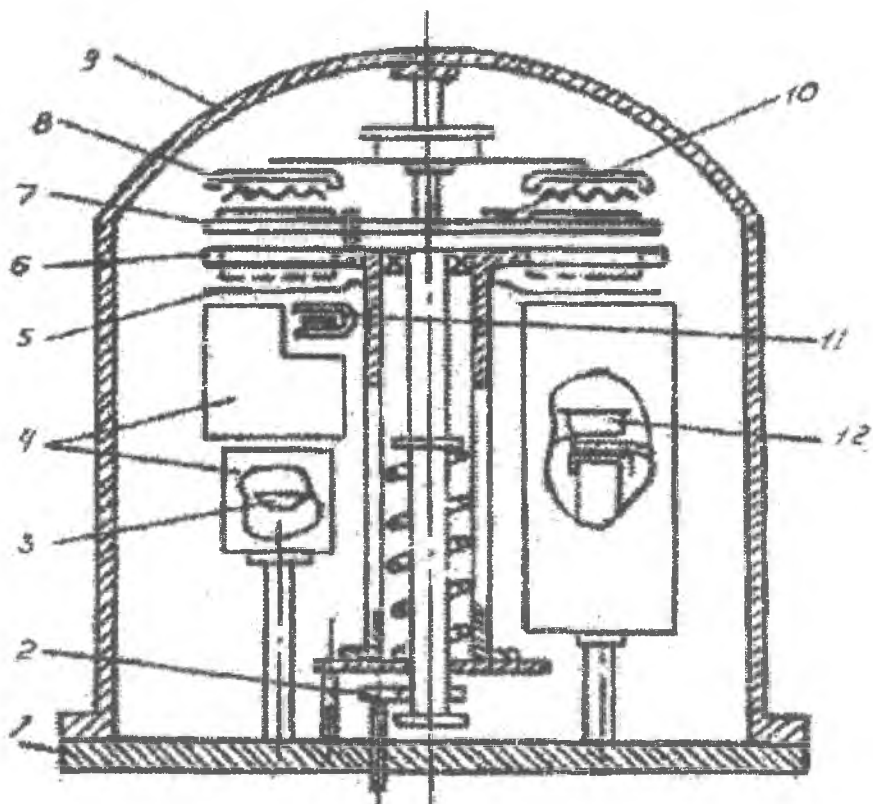


Рисунок 2 - Схема внутрикамерного устройства установки УВН-2М-1.

Над каруселью подложек имеется электронагреватель 8, обеспечивающий нагрев подложек до  $400^\circ\text{C}$ . Контроль толщины пленки в процессе нанесения осуществляется резистивным и резонансно-частотным методами, для чего рядом с каждой подложкой на диске 7

установлен резистивный преобразователь ("свидетель") 10, а на одной из позиций испарения – преобразователь 11 кварцевого измерителя толщины КИТ-1. Кроме того, в установке с помощью реле времени предусмотрен контроль толщины пленки по времени осаждения. Все перечисленные средства контроля связаны с заслонкой 5, автоматически перекрывающей поток испаряемого материала при поступлении на электромагнитный привод заслонки сигнала о достижении заданной величины контролируемого параметра пленки, или по окончании времени осаждения.

Контроль температуры подложек осуществляется датчиками, встроенными в подложкодержатель и подключенными к автоматическому мосту типа МСП1-08. Внутри корпуса установки расположен блок электропитания резистивных испарителей. Рукоятки управления и измерительные приборы блока электропитания находятся на пульте управления. Мощность блока рассчитана на ток через испаритель до 500 А при максимальном напряжении 32 В, что обеспечивает нагрев испаряемого материала до 1500°C. Электропитание электронного испарителя осуществляется от специального блока, выполненного в виде отдельного шкафа и установленного слева от установки. Блок обеспечивает максимальный электронный ток до 200 мА при напряжении на аноде 5 кВ, что позволяет нагревать испаряемый материал до 3000° С.

### *Техническая характеристика УВН-2М-1*

Предельный вакуум в рабочей камере, Па.....	$6,6 \cdot 10^{-5}$
Время достижения предельного вакуума при разогревом паромасляном насосе, мин.....	90
Быстрота откачки, л/с:	
высоковакуумного насоса Н-2Т.....	1500
низковакуумного насоса ВН-7Г.....	7
Размеры рабочей камеры, мм.....	Ø 500×640
Максимальная температура нагрева рабочей камеры, °С.....	90
Питание резистивных испарителей:	
максимальный ток, А.....	500 (5 шт.); 50 (1 шт.)
напряжение (ступени регулировки), В.....	4, 8, 16, 32

## Питание электронно-лучевого испарителя (ЭЛИ):

максимальный ток, мА.....	200
максимальное напряжение, кВ.....	5
Размер подложек, мм.....	60×48×0,6
Допустимая температура нагрева подложек, °С.....	400
Точность совмещения подложки с трафаретом при температуре 300 °С, мкм.....	100
Максимальная потребляемая мощность, кВт.....	9
Расход холодной воды от магистрали с давлением 2-4 ат, л/ч.....	400
Расход горячей воды от магистрали с давлением 2-4 ат, л/ч.....	200
Размеры, мм:	
установки с опущенным колпаком.....	1550×1050×1800
установки с поднятым колпаком.....	1550×1050×2450
шкафа управления ЭЛИ.....	500×600×1750
Масса, кг:	
установки.....	800
шкафа управления ЭЛИ.....	500

## Откачные средства.

Напыление пленочных микросхем производится в вакуумной установке, где с помощью вакуумных насосов создается и поддерживается высокий вакуум в течение всего периода напыления элементов микросхемы. По величине вакуума, который можно получить в откачиваемом объеме, насосы разделяют на три основных класса:

1 – форвакуумные насосы (или насосы предварительного разрежения), позволяющие производить откачку от атмосферного давления 101080 Па до 0,133 Па;

2 – высоковакуумные насосы, создающие разрежение газа в откачиваемом объеме от  $133 \cdot 10^{-2}$  до  $133 \cdot 10^{-6}$  Па;

3 – сверхвысоковакуумные насосы, создающие разрежение газа до давления ниже  $133 \cdot 10^{-6}$  Па.

Таким образом, высокий и сверхвысокий вакуум может быть получен в результате многоступенчатой откачки, при которой первая ступень разрежения создается форвакуумным, вторая - высоковакуумным и третья — сверхвысоковакуумным насосами.

В технологических установках для нанесения тонких пленок в качестве форвакуумных насосов в основном применяют пластинчатороторные и пластинчато-статорные механические вращательные насосы,

а в качестве высоковакуумного насоса — паромасляные диффузионные насосы.

Принцип действия форвакуумных механических насосов основан на механическом выталкивании газа, заполняющего рабочий объем, движущимися частями насоса. Конструкция и принцип работы таких насосов показаны на рис. 3 и 4.

Пластинчато-роторный насос (см. рис.3.) имеет цилиндрический ротор 1, эксцентрично установленный на валу внутри рабочей камеры корпуса-статора 2. При вращении ротора пластины 3, свободно входящие в его прорези, под действием пружины 4 постоянно перемещаются, плотно прижимаясь своими скругленными концами к поверхности статора и разграничивая рабочую камеру на два изолированных друг от друга объема.

Объем А (рис.3,а) в процессе вращении ротора увеличивается и газ, поступающий из откачиваемой системы через впускной патрубок 5, заполняет его. При дальнейшем движении ротора пластины отсекают этот объем от впускного патрубка, и газ, оказавшись в промежуточном объеме Б (рис.3,б), переносится пластинами в объем В (рис.3,в), соединенный с выпускным патрубком 6. По мере работы насоса объем В уменьшается, газ в нем сжимается и, открывая выхлопной клапан 7, через выпускной патрубок выбрасывается в атмосферу (рис.3,г). Выхлопной клапан служит для предотвращения натекания наружного воздуха внутрь рабочей камеры насоса и открывается только тогда, когда давление газа в объеме В достигает величины, превышающей давление атмосферы и пружины 8. Поочередная работа пластин при вращении ротора обеспечивает непрерывное всасывание, откачку вакуумной системы, к которой насос подсоединен своим впускным патрубком.

Пластинчато-статорный насос (см. рис.4) состоит из цилиндрического эксцентрика-ротора 1, который вращается вокруг оси корпуса-статора 2, постоянно касаясь его внутренней поверхности. Рабочая камера насоса разделяется на два изолированных объема (рис.4,а) подвижной пластиной 3, плотно прижатой к поверхности ротора пружиной 4. По мере вращении ротор отсекает газ (рис.4,б), поступающий в насос через впускной патрубок 5, сжимает (рис.4,в) и выбрасывает его в атмосферу через выпускной патрубок 6, имеющий шариковый клапан 7. Ротор насоса имеет внутреннюю полость для совмещения центра тяжести с осью вращения во избежание сильных биений и вибрации.

На практике пластинчато-роторные и пластинчато-статорные насосы чаще всего выполняют небольшого размера, с быстротой действия 0,5—15 л/с. Предельный вакуум таких насосов не ниже 1 Па.

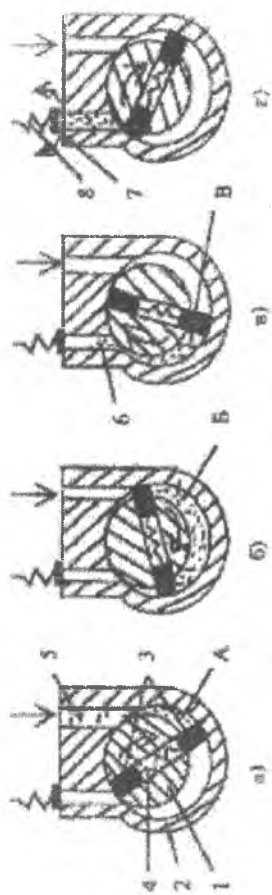


Рисунок 3 - Пластинчато-роторный насос

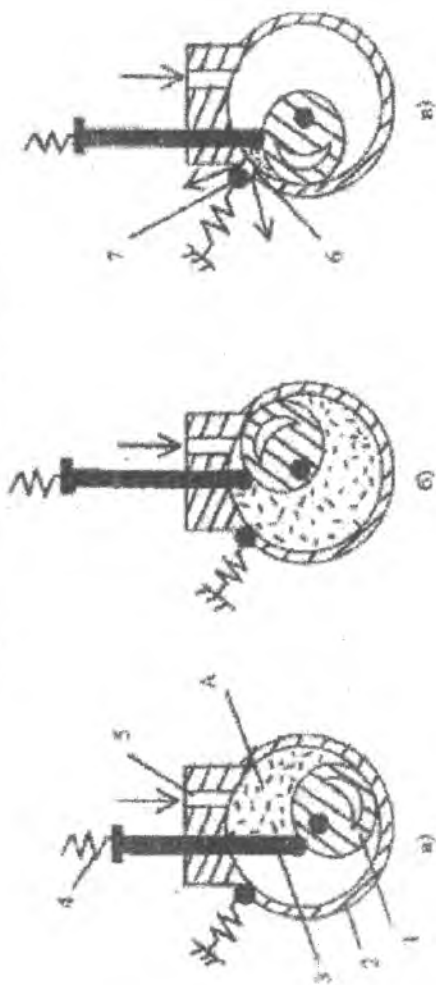


Рисунок 4 - Пластинчато-статорный насос

Механический насос приводится в действие электродвигателем посредством ременной передачи. Насос и электродвигатель обычно устанавливают на одной станине.

**Д и ф ф у з и о н н ы е н а с о с ы .** Принцип действия диффузионных насосов основан на диффузии молекул откачиваемого газа в струю пара рабочей жидкости, которая увлекает эти молекулы за собой из откачиваемой системы. Рабочей жидкостью в таких насосах служат минеральные масла специальной перегонки (ВМ-1 и ВМ-5) и кремнийорганические жидкости (силиконовые масла марок ПФМС-1 и ПФМС-2). На рисунке 5 показана схема двухступенчатого пароструйного насоса.

Оба сопла являются диффузионными. В первой ступени работает верхнее сопло 3, а во второй — нижнее 2. В нижней части насоса находится рабочая жидкость 8 (диффузионное масло ВМ-2, ГОСТ 1984-56), нагреваемая электрической плиткой 9. Пары масла поступают в сопла 2 и 3 от общего испарителя, но подводятся к ним по самостоятельным каналам. К верхнему соплу 3 они поступают по внутреннему цилиндрическому паропроводу, к нижнему 2 — по внешнему паропроводу в виде кольцевой щели. Образовавшийся пар, поднимаясь по паропроводам, с большой скоростью выбрасывается через верхнее и нижнее сопла в виде струй, направленных под углом  $\alpha$  к оси корпуса насоса, стенки которого непрерывно охлаждаются проточной водой (вход 1, выход 5). Насос соединен с откачиваемым объемом впускным отверстием 4, через которое молекулы газа проникают (диффундируют) в струю пара и направляются на стенки корпуса 6, охлаждаемые водой. На стенках пары конденсируются, образуя капли жидкости, стекающие в испаритель. Таким образом обеспечивается непрерывная циркуляция рабочей жидкости в насосе. Газ, увлекаемый струей пара, перемещается вниз, диффундирует во вторую струю и откачивается через выпускное отверстие 7 механическим насосом за счет разрежения на выходе пароструйного насоса.

Перед включением пароструйного насоса в работу необходимо обеспечить во всем его объеме предварительное разрежение и водяное охлаждение кожуха. Если прекращается подача воды, то насос перегревается, масло сгорает и, следовательно, насос не работает. После включения вначале возможно сильное газоотделение из масла, однако уже через 20 — 40 минут насос развивает полную мощность. Газоотделения можно избежать, если насос после выключения держать под вакуумом. Попадание воздуха в насос приводит к окислению масла

кислородом, оно теряет свои вакуумные свойства и подлежит замене, поэтому перед включением установки необходимо поставить кран-переключатель так, чтобы избежать натекания воздуха в паромасляный насос.

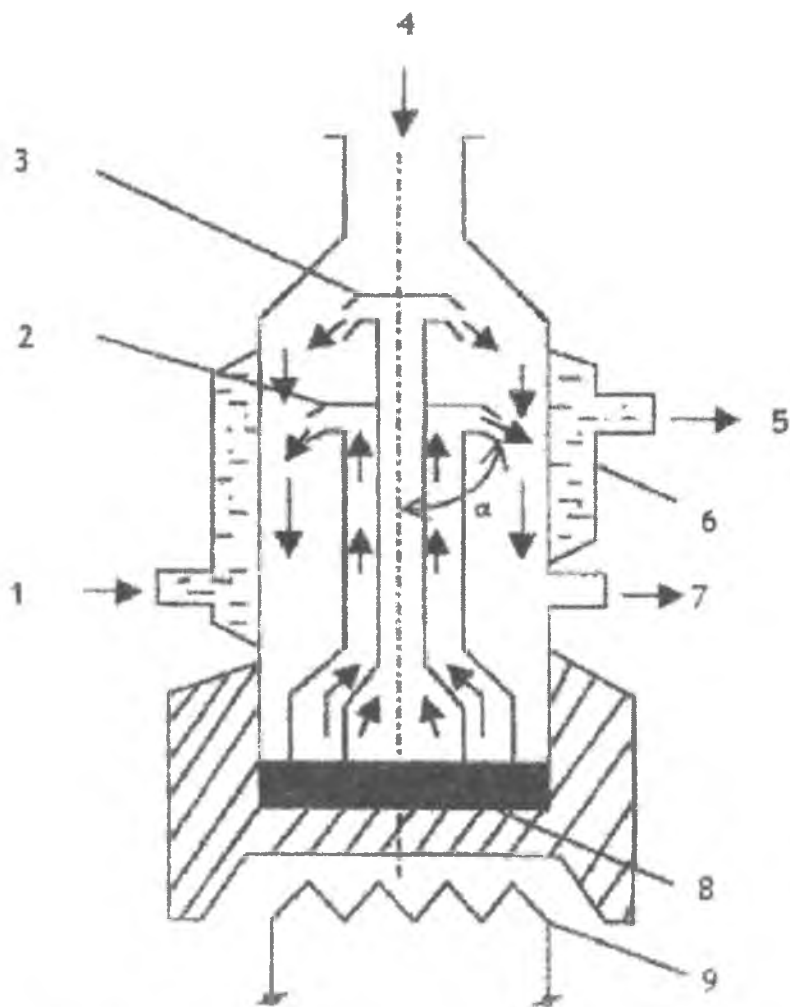


Рисунок 5 - Схема пароструйного (диффузионного) насоса



## ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ ВАКУУМА.

Для измерения низкого, среднего и высокого вакуума широкое распространение получили тепловые и ионизационные манометры.

### Тепловые манометры.

В тепловых манометрах использована зависимость теплопроводности газов от давления. Конструктивно они делятся на манометры сопротивления и термопарные.

Схема термопарного манометра с манометрической лампой и измерительной частью изображена на рис.6. На ней обозначены следующие элементы: миллиамперметр 1, милливольтметр 2, трубка 3, подогреватель 4, термопара 5 и реостат 6.

Манометрическая лампа представляет собой стеклянную колбу, в которой на двух вводах смонтирован подогреватель 4, к двум другим приварена термопара 5, спай которой, в свою очередь, приварен к подогревателю (в точке А). Подогреватель нагревается током, который можно регулировать реостатом 6 и измерять миллиамперметром 1. Спай термопары, нагреваемый от подогревателя, является источником термо ЭДС, значение которой показывает милливольтметр 2. К вакуумной системе манометрическая лампа присоединяется трубкой 3.

Пока давление в вакуумной системе равно атмосферному, стрелка миллиамперметра при заданном для данной манометрической лампы токе накала стоит вблизи нуля.

Далее стрелка милливольтметра при достаточном понижении давления системы начинает перемещаться в сторону увеличения термо ЭДС, т.к. с уменьшением теплопроводности газа повышается температура спаев. Когда давление понизится настолько, что теплопроводность газа станет очень малой, стрелка милливольтметра при правильно установленном

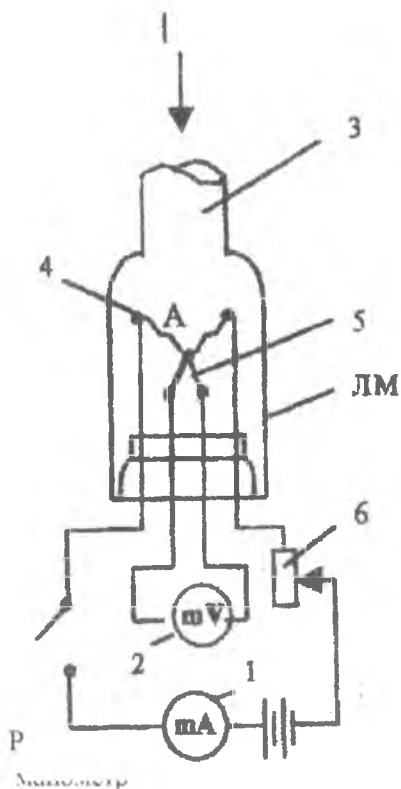


Рисунок 6 - Термопарный манометр

токе  $I_n$  останавливается на предельном давлении. В этот момент потеря тепла подогревателем и термопарой обуславливается практически только теплопроводностью самих проволок и их излучением.

Достоинством тепловых манометров является их применимость ко всем газам и парам, возможность непрерывного наблюдения за измерением давления в вакуумной системе, простота изготовления.

К недостаткам следует отнести зависимость их показаний от рода газа, а также наличие тепловой инерции, вследствие которой при быстром изменении давления нить манометра сопротивления или подогреватель термопарного манометра не успевают сменить свою температуру до значения, соответствующего градуировке, и манометр со своими показаниями "запаздывает". Существенным недостатком является также изменение тока накала с течением времени работы.

### Ионизационные манометры

На рис.7 изображена манометрическая лампа электронного ионизационного манометра, который в дальнейшем будем называть просто ионизационным. Описываемая лампа принципиально не отличается от самых ранних конструкций. Она содержит элементы: катод 1, анод 2 в виде сетки, коллектор ионов 3 в виде охватывающего цилиндра, имеющего по отношению к катоду 1 отрицательный потенциал, выводы катода 4, выводы анода 5, стеклянную колбу 6, трубку 7 для присоединения к вакуумной системе и вывод коллектора ионов 8.

Эмиттируемые накаленным катодом электроны под действием ускоряющего электрического поля устремляются к сетке, создавая в ее цепи электронный ток.

Отметим, что ввиду большого шага сетки не все электроны сразу попадают на сетку, значительная часть их пролетает между ее витками в пространство между сеткой и коллектором ионов, и в основном здесь происходит ионизация остаточного газа электронами.

Однако при движении в этом пространстве электроны находятся в тормозящем поле. Не дойдя до коллектора ионов, они останавливаются и начинают движение обратно к сетке; снова значительная часть их проходит между витками сетки и под действием тормозящего поля катода, не долетев до него, поворачивает снова к сетке и т.д. Каждый электрон может сделать несколько таких колебаний, прежде чем попасть на сетку. Эти колебания играют положительную роль, так как благодаря им электроны пролетают большой путь и, следовательно, повышается вероятность столкновения их с молекулами газа и ионизации последних, а это ведет к увеличению ионного тока.

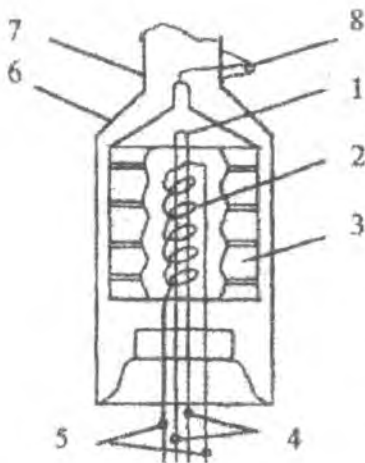


Рисунок 7 -  
Ионизационный манометр

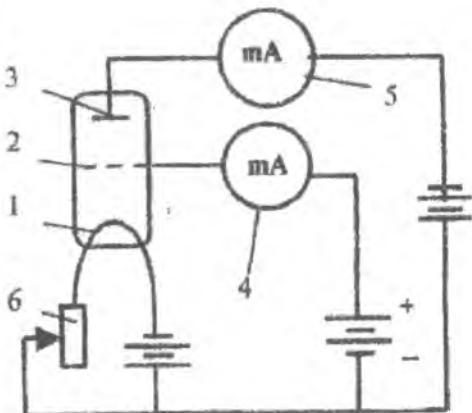


Рисунок 8 - Упрощенная схема  
включения ионизационного манометра

С той же целью – увеличить путь электронов, пролетающих между витками сетки по направлению к коллектору ионов – расстояние между сеткой и коллектором делается относительно большим. Образующиеся положительные ионы под действием ускоряющего поля устремляются к коллектору и, отдавая свой положительный заряд, создают в его цепи ионный ток (отсюда и название коллектора ионов). На рис. 8 показаны основные элементы манометрической лампы и упрощенная схема измерительной части ионизационного манометра, в которую входят, катод 1, сетка 2, коллектор ионов 3, прибор для измерения электронного тока 4, прибор для измерения ионного тока 5 и реостат 6.

Обозначим электронный ток через  $I_e$ , ионный ток через  $I_i$ . Как показал опыт, при достаточно низких давлениях (обычно ниже  $0,13 \cdot 10^{-3}$  Па) отношение  $I_i / I_e$  (ионного тока к электронному) прямо пропорционально давлению газа в манометрической лампе:  
 $I_i / I_e = KP$ . Это отношение и лежит в основе работы ионизационного манометра

Множителем пропорциональности  $K = (I_i / I_e) / (1/P)$  определяется чувствительность манометра: очевидно, чувствительность тем больше, чем больше отношение  $I_i / I_e$  при данном давлении.

Если чувствительность манометра  $K$  известна, то давление можно оценивать значением отношения  $I_i / I_e$ , которое поэтому иногда называют вакуумным фактором.

При измерении давления ионизационным манометром элект-

ронный ток поддерживают постоянным: в связи с этим можно записать  $I_e = CP$ , где множителем  $C = I_e K$  обозначена постоянная ионизационного манометра, характерная для данной конструкции. На основании этого давление определяется соотношением

$$P = I_i / C .$$

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

Отметим, что правильнее было бы говорить о пропорциональности отношения  $I_i / I_e$  не давлению газа, а его молекулярной концентрации, но для простоты рассуждения это отношение обычно связывают с давлением.

### **Измерение давления с помощью ионизационного термопарного вакуумметра типа ВИТ-1А**

Вакуумметр типа ВИТ-1А предназначен для измерения вакуума и представляет собой комбинированную измерительную установку, состоящую из ионизационной манометрической лампы типа ПМИ-2, термопарных манометрических ламп ПМТ-2, электронной измерительной схемы, схемы для питания нагревателя термопар и прибора, измеряющего термо ЭДС.

Прежде чем приступить к измерению низкого или высокого вакуума, необходимо изучить описание и инструкцию по эксплуатации установки вакуумного напыления и вакуумметра ВИТ-1А (см. приложение).

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с подколпачным устройством и другими основными узлами вакуумной установки типа УВН-2М-1.
2. Подготовить установку вакуумного напыления к работе согласно инструкции, изложенной в п. "Схема и принцип работы вакуумной установки серии УВН".
3. Загрузить испаритель материалом для напыления.
4. На карусель масок установить необходимые маски.
5. Установить подложку в подложкодержатель для напыления проводящего или резистивного материала.
6. Установить расстояние от подложки до испарителя в пределах 100...300 мм (по заданию преподавателя) и занести это значение в тетрадь.
7. С разрешения преподавателя включить форвакуумный насос. Включение производить согласно инструкции по эксплуатации вакуумной установки. Откачать до давления не менее чем 1,33 Па.
8. Замеряя давление в откачиваемой системе, снять зависимость  $P = f(t)$ . Измерение вакуума производить с помощью термодатного манометра через каждую минуту работы установки. Включение вакуумметра ВИТ-1А производить согласно инструкции по его эксплуатации.
9. По достижении давления 1,33 Па согласно инструкции по эксплуатации УВН подготовить к включению диффузионный насос. Предварительно убедиться в пуске воды для охлаждения высоковакуумного насоса. Время разогрева и начала работы 20 мин.
10. Согласно инструкции по эксплуатации ионизационного вакуумметра ВИТ-1А подготовить прибор для измерения высокого вакуума. Снять зависимость давления  $P = f(t)$  в диапазоне  $133 \cdot (10^{-2} - 10^{-5})$  Па. Измерение вакуума производить через каждую минуту работы установки.
11. Произвести напыление проводящего или резистивного материала.
12. Выключить диффузионный насос, не выключая форвакуумного и не отключая воду. После охлаждения диффузионного насоса выключить форвакуумный насос. Время охлаждения не менее 30 минут. В процессе выключения диффузионного и форвакуумного насосов снять зависимость давления  $P = f(t)$ . Измерение вакуума производить через каждую минуту.

13. Выключить ионизационный манометр.
14. Впустить воздух под колпак. Поднять колпак, снять подложку. (Внимание! Детали подколпачного устройства горячие!).
15. Опустить колпак.
16. Выключить терморпарный манометр, форвакуумный насос и энергопитание вакуумной установки.
17. Подложку с напыленной пленкой осмотреть визуально и под микроскопом, положить в конверт, написать фамилию и номер группы и сдать преподавателю.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** Напыленная пленка используется в качестве макета для исследования в последующей лабораторной работе.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы и задание.
2. Схема вакуумной установки и перечень ее узлов.
3. Конструкции манометров и насосов.
4. Таблицы измерений низкого и высокого вакуума и графики зависимости давления от времени откачки и после выключения диффузионного насоса
5. Результаты анализа качества полученной пленки.
6. Выводы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите схему откачной системы вакуумной установки.
2. Перечислите основные средства получения вакуума и поясните принцип их действия.
3. Опишите способы измерения вакуума в вакуумных напылительных установках.
4. Нарисуйте схемы манометров и объясните принцип их работы.
5. Нарисуйте структурную схему и объясните принцип работы вакуумметра ВИТ-1А
6. Опишите порядок включения и выключения вакуумной установки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок – М.: Радио и связь, 1989 – 400 с.

Ермолаев Ю.П. и др. Конструкции и технология микросхем и микропроцессоров – М.: Сов. радио, 1980 – 256 с.

Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров – М.: Радио и связь, 1987 – 464 с.

Парфенов О. Д. Технология микросхем – М.: Высшая школа, 1986 – 320 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Краткое описание и инструкции по эксплуатации ионизационного термопарного вакуумметра ВИТ-1А

Диапазон давлений, измеряемый вакуумметром –  $26,6-133 \cdot 10^{-7}$  Па.

Давление в пределах от 26,6 Па измеряется термопарной манометрической лампой, от  $0,133$  до  $133 \cdot 10^{-7}$  Па – ионизационной манометрической лампой. Блок-схема прибора показана на рис.П1.



Рисунок П1 - Блок-схема прибора ВИТ-1А

В ионизационном вакуумметре для измерения давления газа используется ионизация газа, вызываемая потоком электронов накаливаемого катода лампы ПМИ-2.

## Измерение низкого вакуума с помощью термопарной лампы ПМТ-2

1. Соединить вакуумно-плотно термопарную лампу с обследуемым объектом.

2. Подключить кабель питания к термопарной лампе, второй конец кабеля подключить к вакуумметру.

3. Поставить реостат РЕГУЛИРОВКА ТОКА НАКАЛА в крайнее левое положение.

Включить штепсельную вилку в сеть 220 В.

5. Включить тумблер ТЕРМОВАКУУММЕТР и тумблер СЕТЬ 220 В, при этом должны загореться сигнальные лампочки.

6. Поставить переключатель ТОК НАКАЛА - ИЗМЕРЕНИЕ в положение ТОК НАКАЛА.

7. Установить по нижней шкале прибора рабочий ток нагревателя, указанный на баллоне данной термопарной лампы ПМТ-2.

8. Перевести переключатель ТОК НАКАЛА - ИЗМЕРЕНИЕ в положение ИЗМЕРЕНИЕ и сделать отсчет в милливольттах. Отсчет в милливольттах перевести в единицы давления (Па) по градуировочной кривой термопарной лампы ПМТ-2 (рис. П2).

## Измерение высокого вакуума с помощью ионизационной лампы ПМИ-2

Перед включением ионизационного вакуумметра необходимо убедиться при помощи термопарного вакуумметра, что давление в обследуемом объеме не выше чем 0,133 Па. Включение ионизационной манометрической лампы ПМИ-2 при давлении выше 0,133 Па может привести к преждевременному выходу ее из строя. Длительная работа ионизационной лампы ПМИ-2 при давлениях  $133 \cdot 10^{-3}$ ,  $133 \cdot 10^{-4}$  Па сокращает срок ее службы.

### Правила работы с прибором

1. Присоединить кабель к ионизационной манометрической лампе ПМИ-2, соединенной вакуумно-плотно с обследуемым объектом, другой конец кабеля соединить с вакуумметром.

2. Поставить верхний переключатель в положение ПРОГРЕВ, средний переключатель под прибором - в положение УСТАНОВКА НУЛЯ, переключатель под прибором М 24-12 — в положение ЭМИССИЯ.

Включить сеть переключателем СЕТЬ 220 В, при этом должна загореться сигнальная лампа, расположенная рядом с переключателем. Дать вакуумметру в течение 2-3 мин прогреться.



3. Отрегулировать усилитель ионного тока. Для этого необходимо поставить переключатель под прибором ионизационного вакуумметра в положение ИЗМЕРЕНИЕ, переключатель шкалы - в положение  $10^3$  и потенциометром РЕГУЛИРОВКА НУЛЯ установить стрелку измерительного прибора на нуль шкалы.

Вакуумметром термопарным проверить давление в откачиваемой системе: если оно ниже 0,133 Па, то можно подготовить вакуумметр ионизационный к измерению давления, поставив переключатель МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ в положение  $10^3$ , переключатель под прибором --- в положение ЭМИССИЯ.

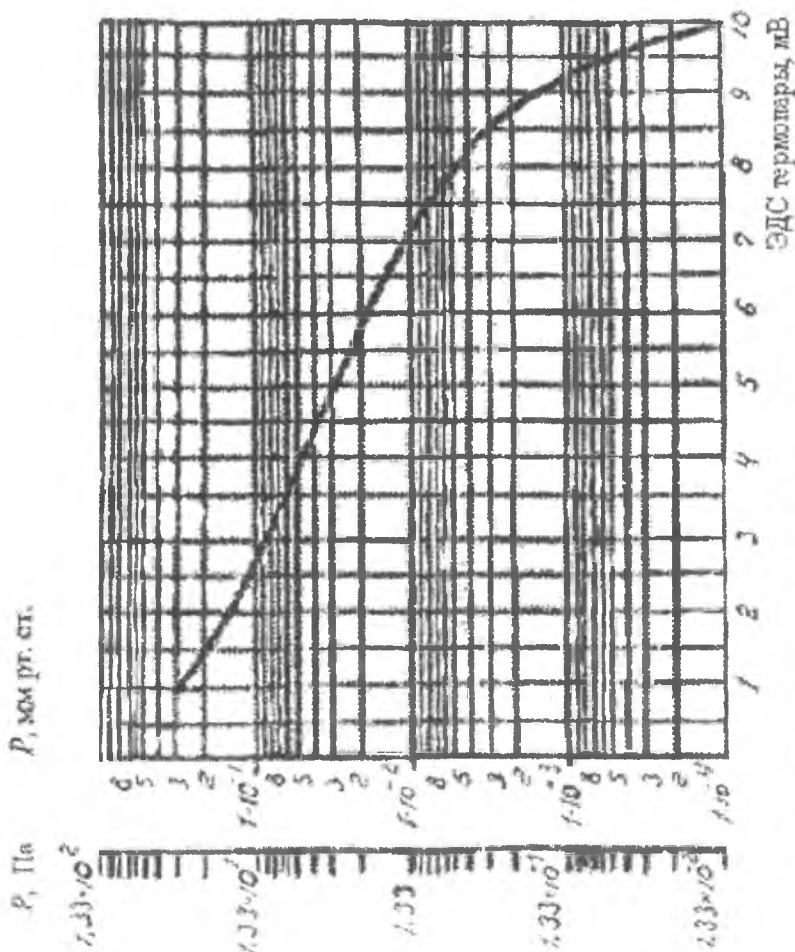


Рисунок П2-Г градуировочная кривая лампы типа ПМТ-2

6. Переключателем НАКАЛ включить накал ионизационной манометрической лампы ПМИ-2. В это время должна загореться сигнальная лампа, находящаяся рядом с переключателем, а стрелка прибора установится на середине шкалы — возле риски с индексом "А".

7. После прогретья сетки ионизационной манометрической лампы ПМИ-2 в течение 10-15 мин надо правильно установить ток эмиссии лампы ПМИ-2. Для этого необходимо верхний правый переключатель перевести из положения ПРОГРЕВ в положение ИЗМЕРЕНИЕ и потенциометром РЕГУЛИРОВКА ЭМИССИИ перевести стрелку прибора на риску с индексом "А", что соответствует току эмиссии 5мА.

**Примечание:** не следует регулировать эмиссию при прогреве сетки ПМИ-2.

8. Произвести калибровку чувствительности усилителя. Для этого необходимо поставить переключатель шкалы в положение КАЛИБРОВКА и потенциометром КАЛИБРОВКА установить стрелку измерительного прибора на конец шкалы, предварительно установив переключатель под прибором ЭМИССИЯ – ИЗМЕРЕНИЕ в положение ИЗМЕРЕНИЕ. Ток эмиссии должен быть установлен точно 5 мА (риска "А").

9. После того как стрелка прибора установлена на ноль шкалы, правильно установлена калибровка прибора, прогрета сетка лампы и правильно установлена величина тока эмиссии лампы ПМИ-2, равная 5 мА, можно произвести измерение давления. Для этого необходимо:

установить переключатель под измерительным прибором в положение ИЗМЕРЕНИЕ: переключатель шкалы установить в такое положение, при котором отсчет по измерительному прибору будет достаточно хорошим. Давление в измеряемом объеме равно отсчету по измерительному прибору, умноженному на соответствующий множитель переключателя шкалы.

Учебное издание

**ИЗУЧЕНИЕ УСТАНОВКИ ТОНКОПЛЁНОЧНОГО НАПЫЛЕНИЯ  
МАТЕРИАЛОВ**

*Методические указания к лабораторной работе*

Составители:

Пиганов Михаил Николаевич

Дмитрисв Василий Дмитриевич

Архипов Алексей Владимирович