

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Московский государственный институт электроники и математики
(Технический университет)**

**Кафедра “Технологические
системы электроники”**

МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

**Методические указания к лабораторному практикуму по дисциплине
ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА**

Москва 2004

УДК 621.53

Методические указания являются составной частью системы методического обеспечения дисциплины «Вакуумная техника», изучаемой студентами 4 курса специальности 2005 – «Электронное машиностроение».

Основным содержанием является краткое описание теории работы манометрических преобразователей, применяемых для измерения полного давления в разреженных газовых средах, их конструкции, порядка работы с вакуумметрами.

Манометрические преобразователи: Метод. указания к лаб. работам по курсу «Вакуумная техника»/ Моск. гос. ин-т электроники и математики; Сост. Ю.Д. Плотников. М., 2004. 18 с.

Ил. 9.

ISBN 5-94506-071-2

МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Цель работы: ознакомиться с основами теории работы манометрических преобразователей, их конструкциями и основными техническими характеристиками.

Содержание работы:

– ознакомиться с устройством и конструкцией манометрических преобразователей, применяемых в лабораторном практикуме по вакуумной технике;

– научиться включать вакуумметры;

– измерить полное давление разреженной газовой среды в работающих вакуумных установках.

ТЕПЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Принцип действия тепловых преобразователей основан на зависимости молекулярной теплопроводности газа от его давления. Перенос теплоты происходит от тонкой металлической нити, нагреваемой электрическим током, через разреженный газ к баллону, находящемуся при комнатной температуре. Измерительное уравнение теплового манометрического преобразователя можно записать так

$$P = \frac{I_n R - (E_{изл.} - E_{mat.})}{K_T (T_n - T_б)}, \quad (1)$$

где $T_n, T_б$ - температуры нити и баллона;

I_n - ток накала металлической нити с сопротивлением R_n ;

$E_{изл.}, E_{mat.}$ - энергия, рассеиваемая за счет излучения и переноса тепла по нити к электродам;

K_T - коэффициент молекулярной теплопроводности газа (при высоком вакууме).

Для точного измерения давления необходимо, чтобы $E_{чсл.} > (E_{изл.} + E_{mat.})$, то есть чтобы сумма тепловых потерь на излучение и за счет

передачи тепла по нити к электродам была существенно меньше мощности $I_n^2 R_n$, выделяющейся в нити преобразователя.

Из уравнения (1) видно, что давление P является функцией двух переменных: тока накала нити I_n и температуры нити T_n . Существует два метода измерения давления тепловыми вакуумметрами: при постоянном токе накала нити и при постоянной температуре нити. В первом случае ток накала нагревательного элемента поддерживается постоянным; мерой давления газа (вакуума) служит температура нагревателя T_n . Во втором случае температура нагревателя поддерживается постоянной; мерой давления служит изменяющийся ток накала нити I_n . Градуировочные характеристики тепловых преобразователей приведены на рис. 1.

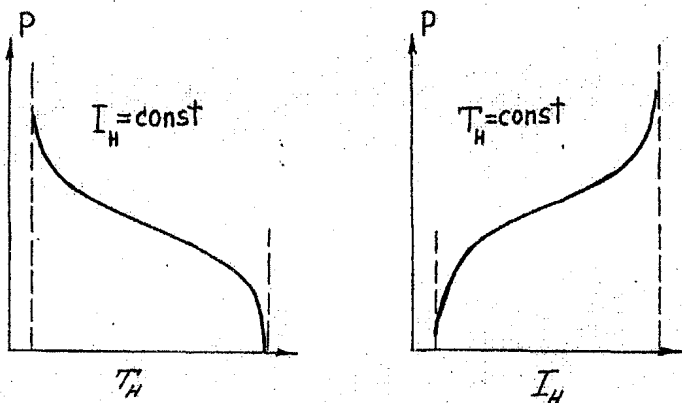


Рис. 1. Градуировочные характеристики тепловых преобразователей:
а) в режиме постоянного тока накала; б) в режиме постоянной температуры нити.

Нижний предел измерения теплового преобразователя ограничен тепловыми потерями на излучение и на вводах нагревателя, которые не зависят от давления газа. Поэтому условие

$$I_n^2 R_n - (E_{изл.} + E_{нат.}) > 0,01 I_n^2 R_n$$

определяет нижний предел измерения теплового преобразователя. Верхний предел измерений обусловлен переходом в вязкостный режим, при котором теплопроводность газа перестает зависеть от давления;

$$K_T \sim \lambda \rho; \quad \lambda \sim 1/P; \quad \rho \sim P,$$

где ρ - плотность газа;

λ - средняя длина свободного пробега м.г.

Тепловые преобразователи являются приборами косвенного действия, поэтому снятие градуировочной характеристики производится с помощью компрессионного манометра, который непосредственно измеряет давление газовой среды.

В лабораторном практикуме по вакуумной технике используется термопарный преобразователь ПМТ-2 и преобразователь сопротивления МТ-6-3. В термопарном преобразователе ПМТ-2, схема которого представлена на рис. 2, в стеклянной колбе закреплены держатели (1), на которых точечной сваркой закреплен V-образный нагреватель из тонкой проволоки (2), к средней точке которого приварен спай хромель-копелевой термопары (3).

По нити нагревателя (2) пропускается ток I_n постоянной величины, который нагревает спай термопары (3), и в ее цепи возникает термо Э.Д.С. Так как температура нагревателя зависит от давления (плотности) газа, то его изменение будет приводить к изменению Э.Д.С. термопары, которая измеряется милливольтметром (5), а ток накала нити I_n регулируется реостатом и измеряется прибором (6).

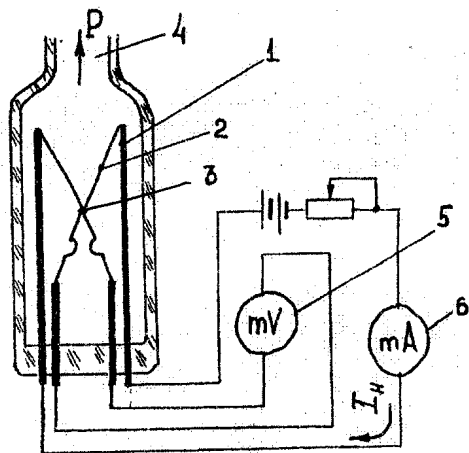


Рис. 2. Схема конструкции термопарного преобразователя:

1 – держатели; 2 – V – образный нагреватель; 3 – спай хромель-копелевой термопары; 4 – трубка для присоединения к вакуумному объему; 5 – прибор для измерения Э.Д.С. термопары; 6 – прибор для контроля тока накала V –образного нагревателя

Порядок работы с термопарным преобразователем ПМТ-2 и вакуумметром ВТ-2А, ВИТ-2 таков:

- 1) тумблер «Сеть 220 В» в термопарной части прибора установить по направлению стрелки; при этом загорается сигнальная лампа;
- 2) установить рабочий ток (ток накала нити) по нижней шкале прибора реостатом «Ток нагревателя»;
- 3) установить переключатель «Измерение - ток нагревателя» в положение «Измерение» и произвести отсчет по верхней шкале прибора (100 делениям соответствует 10 мВ). Полученное значение перевести в единицы давления по градуировочной кривой термопарного преобразователя ПМТ-2, представленной на рис. 3.

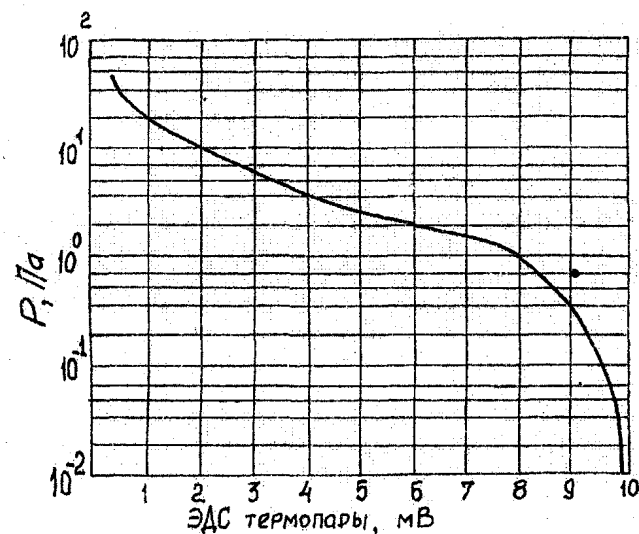


Рис. 3. Градуировочная характеристика термопарного преобразователя ПМТ – 2 (пределы регулировки тока накала I_n V – образного нагревателя 95 – 150 мА)

Преимуществом тепловых преобразователей является их способность непрерывно измерять полное давление всех газов и паров в вакуумном объеме и надежность при аварийных напусках воздуха, так как в конструкции датчика отсутствуют накальные элементы.

Преобразователь сопротивления типа ПМТ-6-3 конструктивно представляет собой металлический тонкостенный цилиндр (1), на цоколе которого с одной стороны закреплен нагреватель (3), а другим концом преобразователь присоединяется к вакуумному объему (смотри рис. 4). В преобразователе ПМТ-6-3 используется зависимость сопротивления нити от температуры. Датчик включается в мостовую схему, в которой I_n измеряется миллиамперметром, включенным в то же плечо моста, что и

преобразователь, а температура нити - по току гальванометра в измерительной диагонали моста. Ток накала регулируется реостатом. Изменение давления газа в объеме преобразователя приводит к изменению температуры нагревателя и, следовательно, его сопротивлению. Это обстоятельство ведет к разбалансу электрического моста и изменению напряжения питания. Так как напряжение питания преобразователя (между точками а, б) зависит от давления, то по его величине и судят о степени вакуума. При изменении давления от 10^{-1} Па до 10^5 Па напряжение питания датчика ПМТ-6-3 изменяется от 0,3 до 7 В.

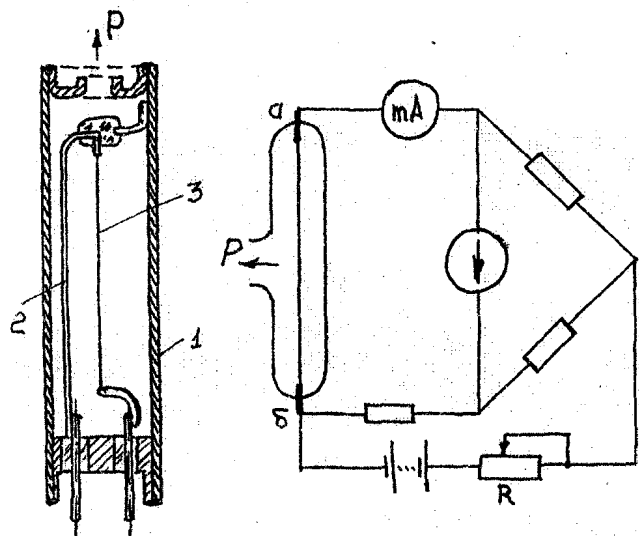


Рис. 4. Манометрический преобразователь сопротивления ПМТ-6-3 и его электрическая схема: 1 - корпус датчика; 2 - держатель; 3 - нагреватель из проволоки диаметром 0,06 мм.

Порядок работы с преобразователем сопротивления ПМТ-6-3 и реле вакуумным РВТ-2М следующий:

- 1) тумблер «Сеть» - «Выкл.» установить в положение «Сеть», при этом должна загореться нить светового индикатора;
- 2) прогреть прибор в течение 3-х минут;
- 3) произвести калибровку прибора при атмосферном давлении в преобразователе, для чего тумблер «Калибровка» - «Измерение», расположенный на передней панели над дверцей, установить в положение «Измерение»; вращая ручку резистора «Уст.10», установить значение аналогового напряжения на уровне 10 В. При этом показание светового резистора должно быть на отметке «А»;
- 4) по уровню светового индикатора определить величину давления в вакуумном объеме.

ЭЛЕКТРОННЫЙ (ИОНИЗАЦИОННЫЙ) ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Работа электронного преобразователя основана на ионизации газа в объеме преобразователя с последующим измерением ионного тока, который является функцией давления или концентрации газа. Уравнение электронного преобразователя имеет следующий вид

$$I_i = I_e P \int_0^r \epsilon dr, \quad (2)$$

где I_i - ионный ток в цепи коллектора;

I_e - ток электронной эмиссии;

ϵ - эффективность ионизации, то есть количество пар ионов, образованных на единичном пути при давлении 1 Па;

P - давление газа в объеме датчика.

Выражение (2) имеет постоянное значение для определенной конструкции преобразователя при постоянных напряжениях на электродах, поэтому уравнение (2) можно записать в виде

$$I_i = S I_\theta P = K_{и} \cdot P; \quad \text{откуда} \quad P = \frac{I_i}{S \cdot I_\theta} = \frac{I_i}{K_{и}}, \quad (3)$$

где S - удельная чувствительность преобразователя, Па^{-1} ;

I_θ - ток электронной эмиссии, мА;

$K_{и}$ - чувствительность преобразователя при фиксированном токе эмиссии, А/Па;

Из выражения (3) следует, что ионный ток I_i пропорционален давлению газа, если во время измерения сохраняется постоянное значение электронного тока. Тогда $K_{и}$ - постоянная электронного преобразователя, равна тангенсу угла наклона градуировочной характеристики к оси давления (смотри рис. 5).

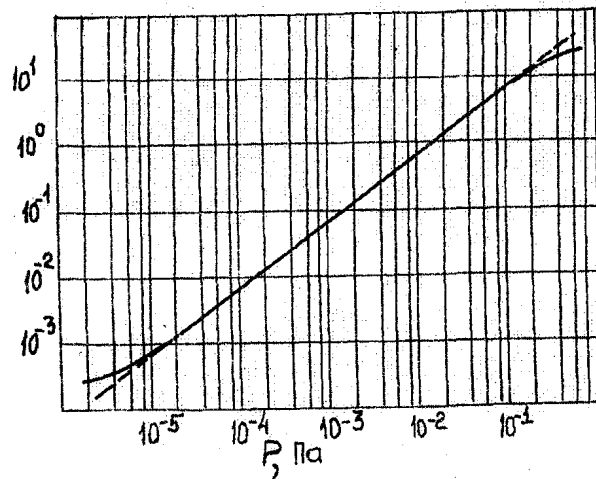


Рис. 5. Вид градуировочной характеристики электронного манометрического преобразователя ПМИ - 2

Верхний предел измерения электронного преобразователя равен 1 Па и соответствует нарушению линейности градуировочной характеристики, когда средняя длина свободного пробега электрона в объеме прибора

становится меньше рассеяния между электродами. Нижний предел измерения определяется фоновыми токами в цепи коллектора, возникающими из-за эмиссии фотоэлектронов в результате мягкого рентгеновского излучения анодной сетки. С учетом фоновых токов рентгеновского излучения уравнение электронного преобразователя имеет вид

$$I = I_i + I_{\text{фон.}} = I_e (S \cdot P + K_s), \quad (4)$$

а нижний предел измерения определяется соотношением ионного и фоновых токов

$$I_i / I_{\text{фон.}} = K_{и} / (K_s \cdot P). \quad (5)$$

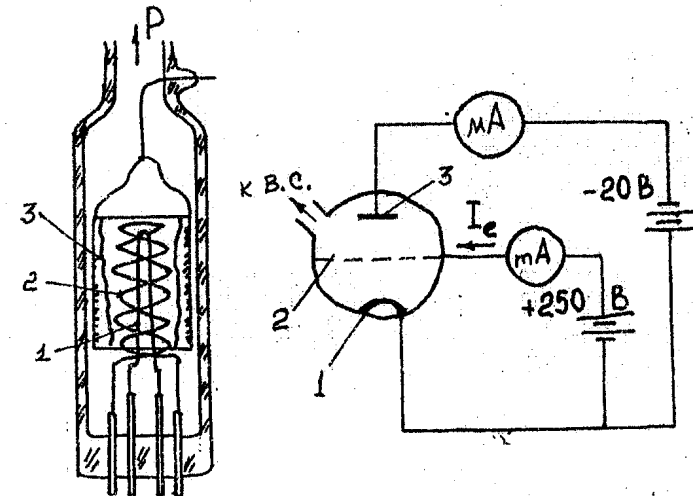


Рис. 6. Электронный преобразователь ПМИ - 2 и схема его включения: 1 - термокатод из вольфрама; 2 - сетка - анод; 3 - коллектор

В лабораторном практикуме используется электронный преобразователь типа ПМИ-2, который представлен на рис. 6. Работа преобразователя происходит следующим образом. Вольфрамовый катод

(1) испускает термоэлектроны при пропускании через него электрического тока, которые ускоряются положительным потенциалом сетки (2). Электроны, разогнавшись до энергий, заведомо больших потенциала ионизации большинства газов, содержащихся в атмосфере, пролетают сквозь анодную сетку (2) и устремляются к коллектору (3). Так как коллектор имеет отрицательный потенциал, то в пространстве между сеткой и коллектором происходят непрерывные колебания электронов (в среднем до пяти раз), прежде чем они попадут на анод. При столкновениях с молекулами газов электроны ионизируют их, а образовавшиеся положительные ионы собираются на коллекторе, образуя в его цепи ионный ток.

Порядок работы с электронным (ионизационным) преобразователем ПМИ-2 следующий.

А. Подготовка к работе электронного преобразователя

- 1) установить тумблеры «Сеть» и «Накал» в положение «Включено»;
- 2) установить переключатель «Множитель шкалы» в положение «Уст. нуля»;
- 3) установить переключатель «Род работы» в положение «Прогрев», а ручку реостата «Установка эмиссии» - в крайнее левое положение;
- 4) включить вилку сетевого кабеля вакуумметра в сеть 220 В.

Б. Измерение давления

Перед включением накального катода преобразователя ПМИ-2 необходимо убедиться, что вакуум в объеме не менее 10^{-1} Па

- 1) установить тумблер «Сеть 220 В» в положение «Вкл.», при этом должна загореться сигнальная лампа. Через 10-15 секунд тумблер «Накал» поставить в положение «Вкл.»;
- 2) в режиме «Прогрев» прогреть преобразователь в течение 10-15

минут;

- 3) установить переключатель «Род работы» в положение «Обезгаживание», обезгаживание проводить в течение 15-20 минут;
- 4) установить переключатель «Род работы» в положение «Установка эмиссии» и реостатом «Установка эмиссии» по стрелочному прибору установить ток эмиссии катода - 0,5 мА;
- 5) установить переключатель «Род работы» в положение «Измерение» и ручкой «Установка нуля» установить стрелку прибора на нуле;
- 6) перейти к измерению давления, для чего переключатель «Множитель шкалы» установить в положение, при котором отсчет ионного тока преобразователя будет достоверным. Величину ионного тока в микроамперах определять как произведение отсчета по стрелочному прибору на соответствующий множитель переключателя «Множитель шкалы».

Пример. Отсчет по стрелочному прибору равен 25 делениям, а переключатель «Множитель шкалы» находится в положении « 10^3 ». Ионный ток в цепи коллектора в этот момент составляет $2,5 \cdot 10^{-2}$ мкА. Давление в вакуумном объеме определяется по формуле

$$P = I_i / K_n, \quad (6)$$

где P - давление газа, Па;

I_i - ионный ток в цепи коллектора;

K_n - чувствительность преобразователя, мкА/Па.

Если значение K_n для преобразователя ПМИ-2 составляет 75-100 мкА/Па, то согласно примеру

$$P = \frac{2,5 \cdot 10^{-2}}{100} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ Па.}$$

МАГНИТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Принцип действия магнитных манометрических преобразователей основан на зависимости тока самостоятельного газового разряда от давления. Электродная система, обеспечивающая поддержание самостоятельного газового разряда в высоком и сверхвысоком вакууме, и характерная траектория движения электрона в инверсно-магнетронном преобразователе представлены на рис. 7.

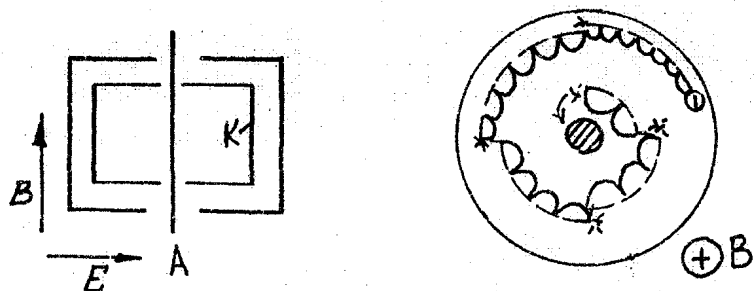


Рис. 7. А - схема расположения электродов; Б - траектория движения электрона в скрещенных электрических и магнитных полях

Электроны, вылетающие из катода в результате автоэлектронной эмиссии, двигаются в скрещенных электрическом и магнитном полях по циклоиде, образованной окружностью диаметром D

$$D = 2m_e E / (eB^2) \quad (7)$$

с угловой частотой вращения $\omega_c = eB/m_e$ и тангенциальной скоростью $v_T = E/B$, (m_e , e - масса и заряд электрона, E - напряженность электрического поля, B - магнитная индукция). При соударении с молекулой газа электрон теряет часть энергии на ее ионизацию и перемещается в радиальном направлении к аноду. Положительные ионы (т.е. ионизированные молекулы газа) двигаются к катоду, практически не

испытывая действия магнитного поля из-за своей значительной массы. Соударение положительных ионов с катодом приводит к появлению вторичных электронов, ток которых пропорционален ионному току. Таким образом, измерительное уравнение магнитного преобразователя имеет следующий вид

$$I_{\text{разр.}} = I_i + I_{\text{втор.}} = \alpha \cdot P^n \quad (8)$$

где $I_{\text{разр.}}$ - разрядный ток, мкА;

I_i - ионный ток;

$I_{\text{втор.}}$ - ток вторичной электронной эмиссии;

$$\alpha = 10^{-2} - 10^{-1} \text{ А/Па}; n = 1 - 1,4.$$

В лабораторном практикуме используется преобразователь инверсно-магнетронный ПММ-46, схема конструкции которого приведена на рис. 8.

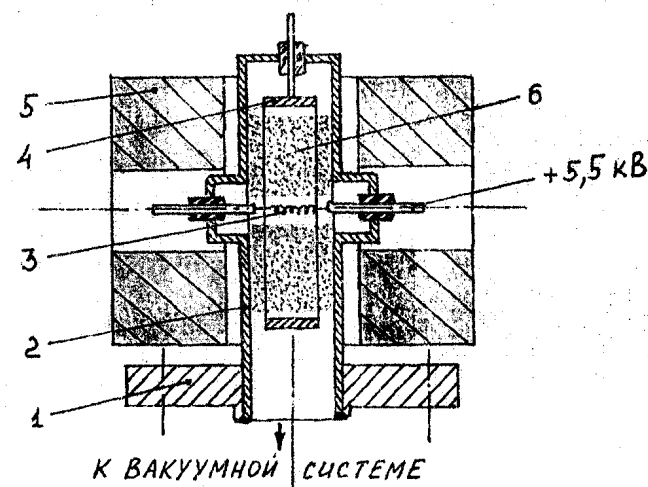


Рис. 8. Схема конструкции манометрического преобразователя ПММ-46: 1 - присоединительный фланец; 2 - корпус преобразователя из немагнитной стали; 3 - нитевидный анод; 4 - полый цилиндрический катод; 5 - съемный постоянный магнит; 6 - разрядный промежуток

Разрядный промежуток (6) образован стержневым анодом (3), окружающим его цилиндрическим катодом (4) торцевыми стенками корпуса (2), ограничивающими разрядный промежуток в осевом направлении. Вся система электродов помещается в осевое магнитное поле с индукцией 0,18 Тс. На анод подается напряжение +5,5 кВ; катод соединен с усилителем постоянного тока и находится под нулевым потенциалом. Преобразователь ПММ-46 обеспечивает преобразование сигнала давления в токовый электрический сигнал в диапазоне давлений $10^{-1} - 10^{-11}$ Па.

Верхний предел измерений связан с ограничением максимального разрядного тока балластным сопротивлением, защищающим измерительную систему от возникновения дугового разряда. Нижний предел измерения определяется значением фоновых токов автоэлектронной эмиссии, который составляет 10^{-13} А (смотри рис. 9). Преимуществом магнитных преобразователей перед электронными является более высокая надежность в работе в связи с заменой накаливаемого катода холодным.

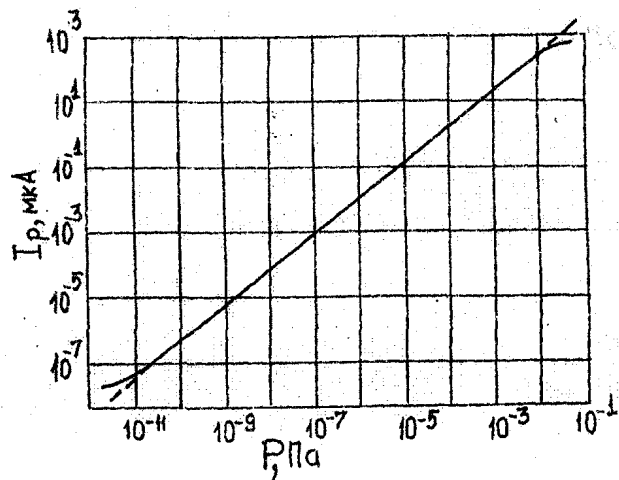


Рис. 9. Градуировочная характеристика инверсно-магнетронного манометрического преобразователя ПММ-46

Порядок работы с магнитным преобразователем ПММ-46 следующий:

- убедиться в том, что давление в вакуумной системе не выше 10^{-2} Па;

1) нажать клавишу красного цвета «220 В»;

2) прогреть в течение 10-15 минут анод преобразователя, для чего нажать кнопку « »;

3) после прогрева вернуть клавишу « » в исходное положение;

4) контролировать давление вакуумной системы по показаниям цифрового вольтметра на лицевой панели вакуумметра ВМБ-1/8-001.

ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Каков принцип работы тепловых манометрических преобразователей для измерения низкого вакуума?

2. Что является чувствительным элементом в термопарном преобразователе и преобразователе сопротивления?

3. Какие факторы обуславливают невозможность измерения давления газа ниже 10^{-2} Па тепловыми преобразователями?

4. Для чего необходимо подавать положительное напряжение 250 В на анодную сетку в ионизационном преобразователе?

5. С чем связана различная чувствительность ионизационного преобразователя для различных газов?

6. Почему нарушается линейность градуировочной характеристики электронного преобразователя в области высоких давлений от 10^1 Па и более?

7. Как сформулировать принцип действия магнитного манометрического преобразователя?

8. Какое действие оказывает на свободный электрон в разрядном промежутке постоянное магнитное поле?

9. Какие элементы в конструкции магнитного преобразователя образуют разрядный промежуток?

10. Чем обусловлена более высокая эксплуатационная надежность магнитного преобразователя перед электронным, особенно при внезапных (аварийных) напусках газа?