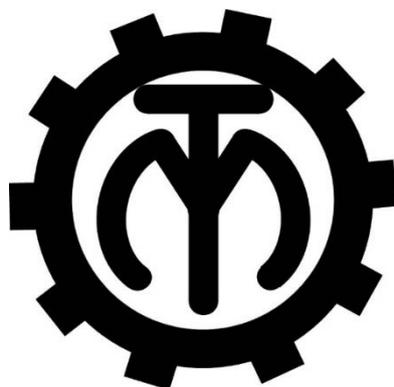


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технология машиностроения»

# ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА И ИСТОЧНИКИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности 1-36 01 04 «Оборудование  
и технологии высокоэффективных процессов  
обработки материалов» дневной формы обучения*



Могилев 2021

УДК 621.3.032.11  
ББК 34.9  
В14

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технология машиностроения» «18» октября 2021 г.,  
протокол № 4

Составители: канд. техн. наук, доц. В. М. Шеменков;  
ст. преподаватель М. А. Рабыко

Рецензент Ю. С. Романович

Методические рекомендации содержат указания для выполнения лабораторных работ в соответствии с рабочей программой дисциплины «Вакуумная техника и источники концентрированных потоков энергии», а также краткие теоретические положения и необходимые справочные данные.

Учебно-методическое издание

## ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА И ИСТОЧНИКИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ

Ответственный за выпуск	В. М. Шеменков
Корректор	Т. А. Рыжикова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2021

## Содержание

1	Изучение преобразователей для измерения давления в вакуумных системах.....	4
2	Исследование вольт-амперной характеристики в зависимости от давления в вакуумной камере .....	17
3	Исследование вольт-амперной характеристики в зависимости от давления в магнитном поле в вакуумной камере.....	31
4	Исследование влияния обработки лазером на различные материалы.....	32
5	Исследование влияния инструмента, модифицированного тлеющим разрядом, на шероховатость поверхности .....	38
	Список литературы .....	42

# 1 Изучение преобразователей для измерения давления в вакуумных системах

**Цель работы:** ознакомление с устройством и конструкцией различных преобразователей для измерения низкого и среднего вакуума, освоение методики измерения вакуума.

## 1.1 Оборудование, инструменты и приборы

- 1 Объекты исследования – комплект деталей.
- 2 Вакуумметр.
- 3 Тепловые, ионизационный и магнитный преобразователи.
- 4 Цифровой таймер.
- 5 Отвертка.

## 1.2 Теоретические сведения

Область давлений, используемая в современной вакуумной технике, –  $10^5 \dots 10^{-12}$  Па. Измерение давлений в таком широком диапазоне не может быть обеспечено одним прибором. На практике при измерении давления разреженных газов применяются различные типы преобразователей, отличающиеся по принципу действия и классу точности.

Приборы для измерения общих давлений в вакуумной технике называют вакуумметрами. Они обычно состоят из двух частей: манометрического преобразователя и измерительной установки. По методу измерения вакуумметры подразделяются на абсолютные и относительные (рисунок 1.1). Показания абсолютных приборов не зависят от рода газа и могут быть заранее рассчитаны. В приборах для относительных измерений используют зависимость параметров некоторых физических процессов, протекающих в вакууме, от давления. Вакуумметры измеряют общее давление газов, присутствующих в вакуумной системе.



Рисунок 1.1 – Классификация вакуумметров для измерения общих давлений

На рисунке 1.2 показаны диапазоны давлений, измеряемые тем или иным видом манометрического преобразователя.

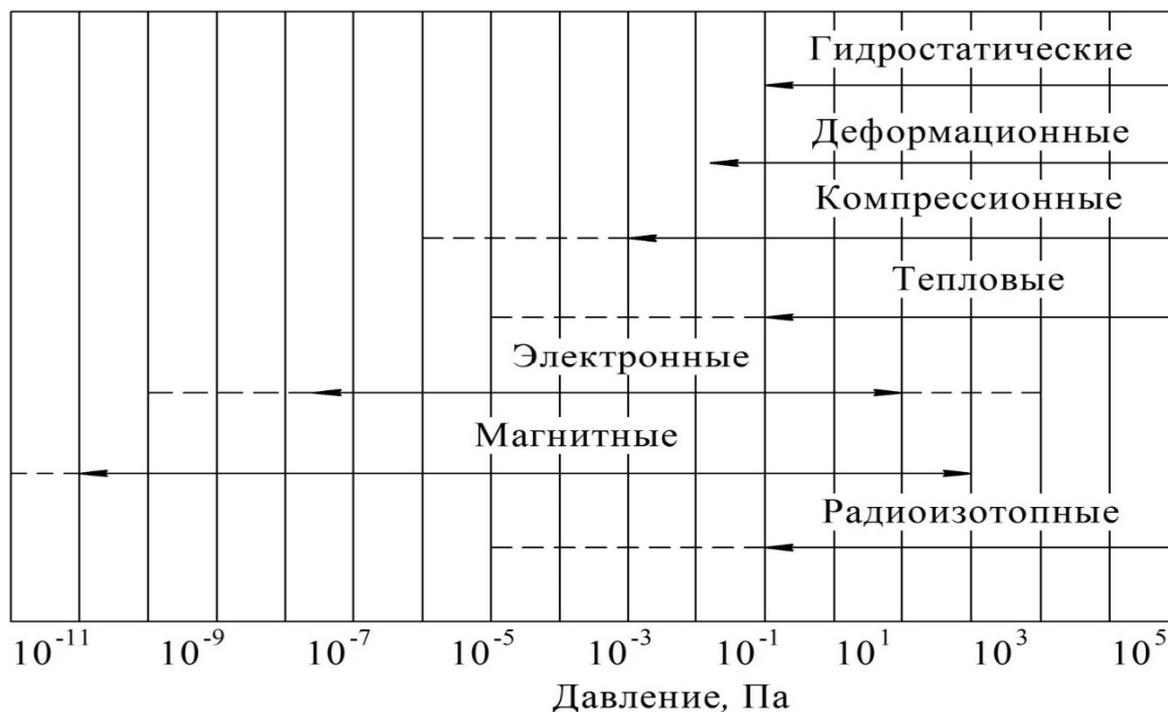


Рисунок 1.2 – Диапазоны давлений, измеряемых различными манометрическими преобразователями

К деформационным преобразователям относятся трубчатые и мембранные преобразователи. Трубка Бурдона – простейший деформационный преобразователь в виде спиральной трубки, скручивающейся под действием атмосферного давления в случае откачки внутренней полости за счет разных радиусов кривизны, а следовательно, и площадей наружной и внутренней поверхности трубки. В основу мембранных преобразователей положено изменение величины прогиба мембраны под действием давления. Диапазон изменения мембранных преобразователей  $10^5 \dots 10^{-1}$  Па, но так как линейность показаний сохраняется только при небольших деформациях мембраны, то один прибор может измерять давления в пределах 2–3 порядков [1].

Простейшими гидростатическими преобразователями являются жидкостные манометры с открытым или закрытым коленом. Манометры с открытым коленом удобны для измерения давлений, близких к атмосферному. Показания такого манометра зависят от атмосферного давления, в отличие от преобразователей с закрытым коленом.

**Тепловые преобразователи.** Принцип действия тепловых преобразователей основан на зависимости теплопередачи через разреженный газ от давления. Передача теплоты происходит от тонкой металлической нити в окружающее пространство и к баллону, находящемуся при комнатной

температуре. Металлическая нить нагревается в вакууме путем пропускания электрического тока.

Уравнение теплового баланса в этом случае можно представить в виде

$$I_H^2 R = E_K + E_T + E_H + E_M, \quad (1.1)$$

где  $I_H$  – ток нити;

$R$  – сопротивление нити;

$E_K, E_M, E_H, E_T$  – потери теплоты за счет конвекции, теплопроводности газа, излучения нити и теплопроводности нити соответственно.

Конвективным теплообменом в области среднего и высокого вакуума можно пренебречь, т. е.  $E_K \approx 0$ .

Потери теплоты за счет излучения можно выразить формулой

$$E_H = K_H \cdot (T_H^4 - T_\sigma^4) \cdot S, \quad (1.2)$$

где  $K_H$  – коэффициент излучения материала нити;

$T_H, T_\sigma$  – температура нити и баллона соответственно;

$S$  – площадь поверхности нити.

Тепловые потери нити за счет передачи теплоты по материалу нити и электродов, соединяющих нить с корпусом преобразователя,

$$E_M = K_{m.n} \cdot (T_H - T_\sigma) \cdot \delta, \quad (1.3)$$

где  $K_{m.n}$  – коэффициент теплопроводности материала нити;

$\delta$  – площадь сечения нити.

Потери теплоты через газовый промежуток рассчитываются по формуле

$$E_M = \lambda \cdot (T_H - T_\sigma) \cdot A, \quad (1.4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газа,  $\lambda = -Ap/(p + B)$ ;

$A, B$  – постоянные, зависящие от рода газа.

В области низкого вакуума  $p \gg B$ , а коэффициент теплопроводности газа не зависит от давления. Давление  $p \approx B$ , соответствующее переходу от среднего в низкий вакуум, является верхним пределом измерения теплового преобразователя. В области высокого вакуума, когда  $p \ll B$ , коэффициент теплопроводности пропорционален давлению:

$$\lambda = K_\tau \cdot p. \quad (1.5)$$

С учетом приведенных выражений можно записать

$$P = \frac{I_H^2 \cdot R \cdot (E_N - E_H)}{K_T \cdot (T_H - T_\sigma)}, \quad (1.6)$$

Из уравнения (1.6) видно, что давление является функцией двух переменных – тока накала нити  $I_n$  и температуры нити  $T_n$ . Существует два метода работы тепловых преобразователей: постоянной температуры нити и постоянного тока накала. Градуировочные кривые теплового преобразователя, показанные на рисунке 1.3 для обоих методов работы, представляют собой в средней части параболу и гиперболу.

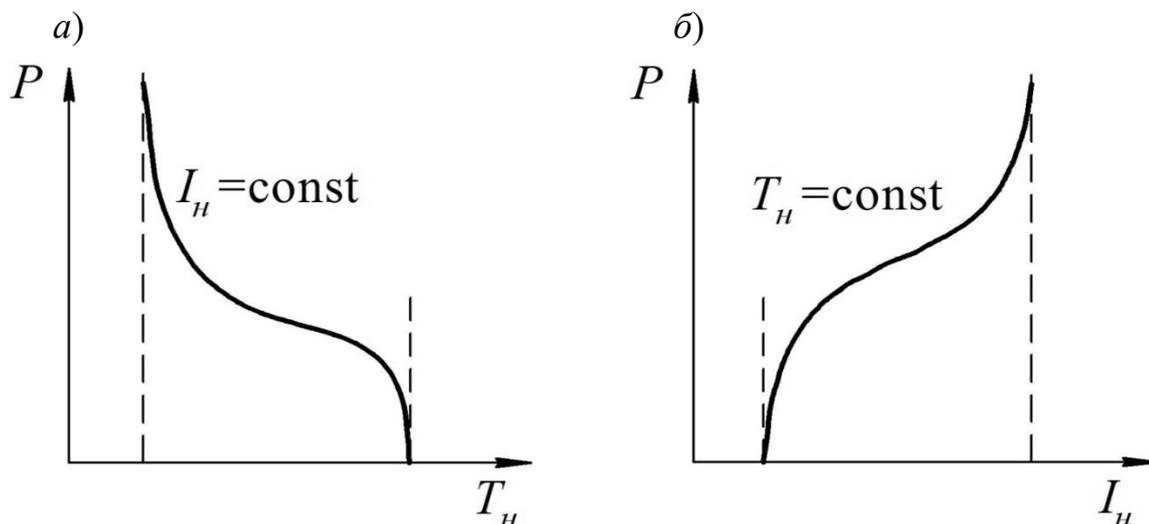


Рисунок 1.3 – Градуировочные кривые теплового преобразователя

Тепловые преобразователи в зависимости от способа измерения температуры делятся на термопарные и преобразователи сопротивления.

В термопарном преобразователе температура нити  $I$  измеряется термопарой 2 (рисунок 1.4). Электроды расположены в стеклянном или металлическом баллоне 3, имеющем патрубок для подсоединения к вакуумной системе.

ТермоЭДС термопары зависит от температуры нити. Если в преобразователе ток накала поддерживается постоянным, то термоЭДС будет зависеть от давления окружающего остаточного газа, т. к. температура нагревателя зависит от его теплопроводности. Следовательно, при понижении давления теплопроводность газа уменьшится, температура нагревателя увеличится, возрастет и термоЭДС термопары. По зависимости термоЭДС от давления определяется давление в системе (рисунок 1.5).

Термопарные преобразователи конструктивно могут изготавливать как в стеклянном, так и в металлическом баллонах.

В преобразователе сопротивления для измерения давления используется температурная зависимость сопротивления материала нити. Он включается в плечо моста постоянного тока (рисунок 1.6). Ток накала нити 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 нити и, следовательно, ее сопротивлению. Это обстоятельство ведет к разбалансированию моста постоян-

ного тока, и ток через измерительную диагональ моста будет пропорционален давлению.

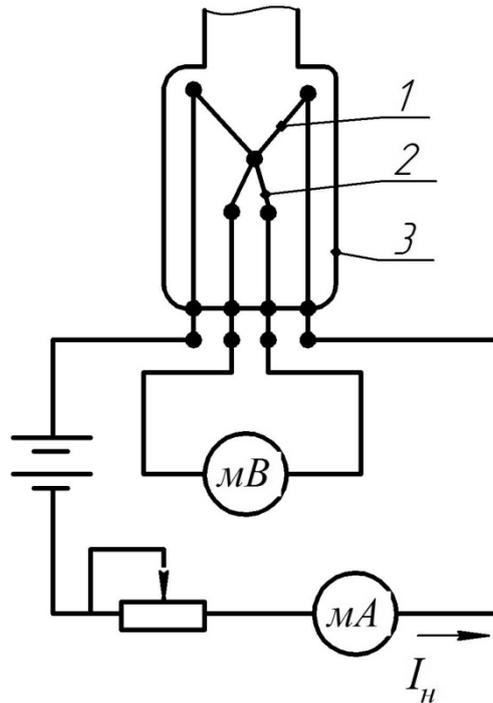


Рисунок 1.4 – Схема термопарного преобразователя

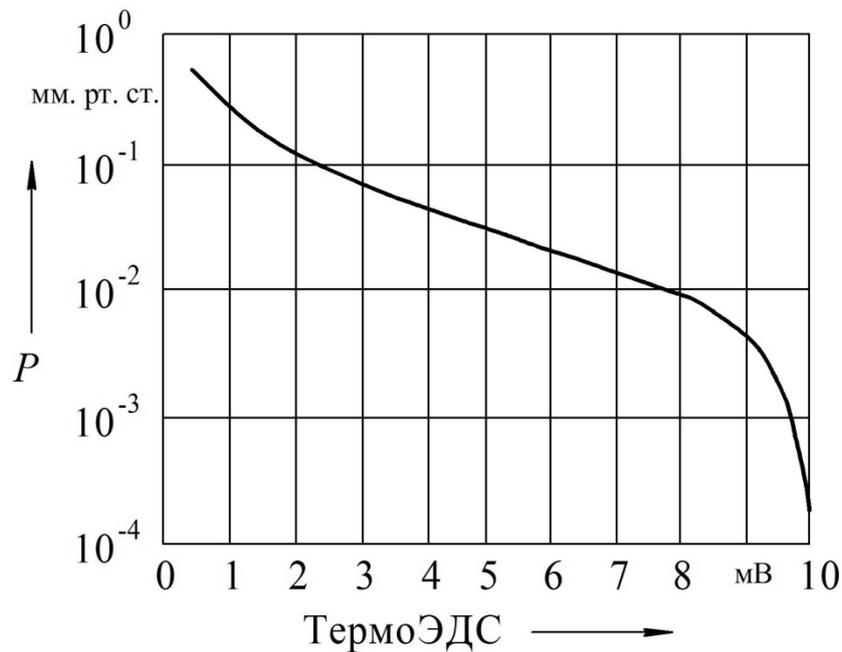


Рисунок 1.5 – Зависимость термоЭДС термопарного преобразователя от давления

Преобразователь сопротивления типа ПМТ-6-3 конструктивно представляет собой корпус 2 в виде металлического тонкостенного цилиндра, который изготавливается из нержавеющей стали, нить накала 1 из платиновой проволоки диаметром 10 мкм и длиной 80 мм. Одним концом преобразователь присое-

диняется к вакуумному объему, на другом конце имеются прижимные (рисунок 1.7, *a*) или стержневые (рисунок 1.7, *б*) электрические контакты.

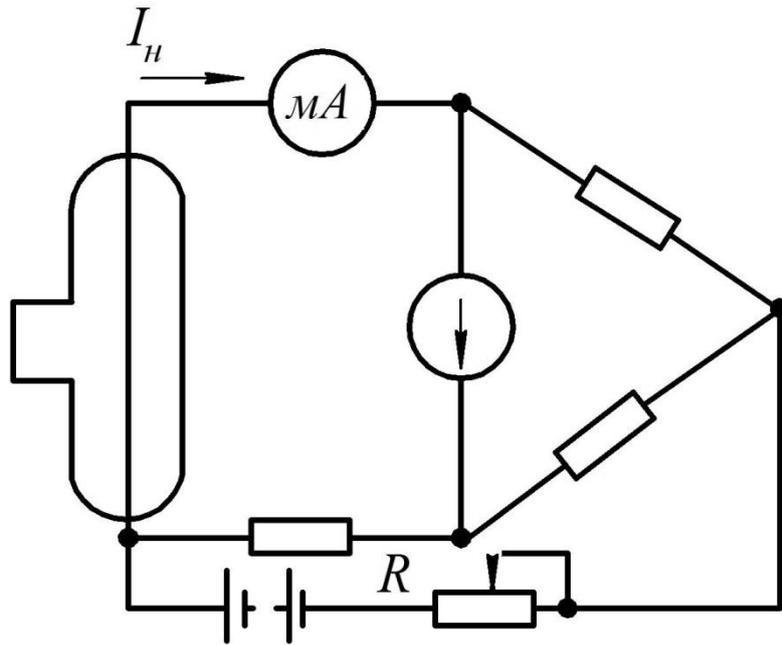
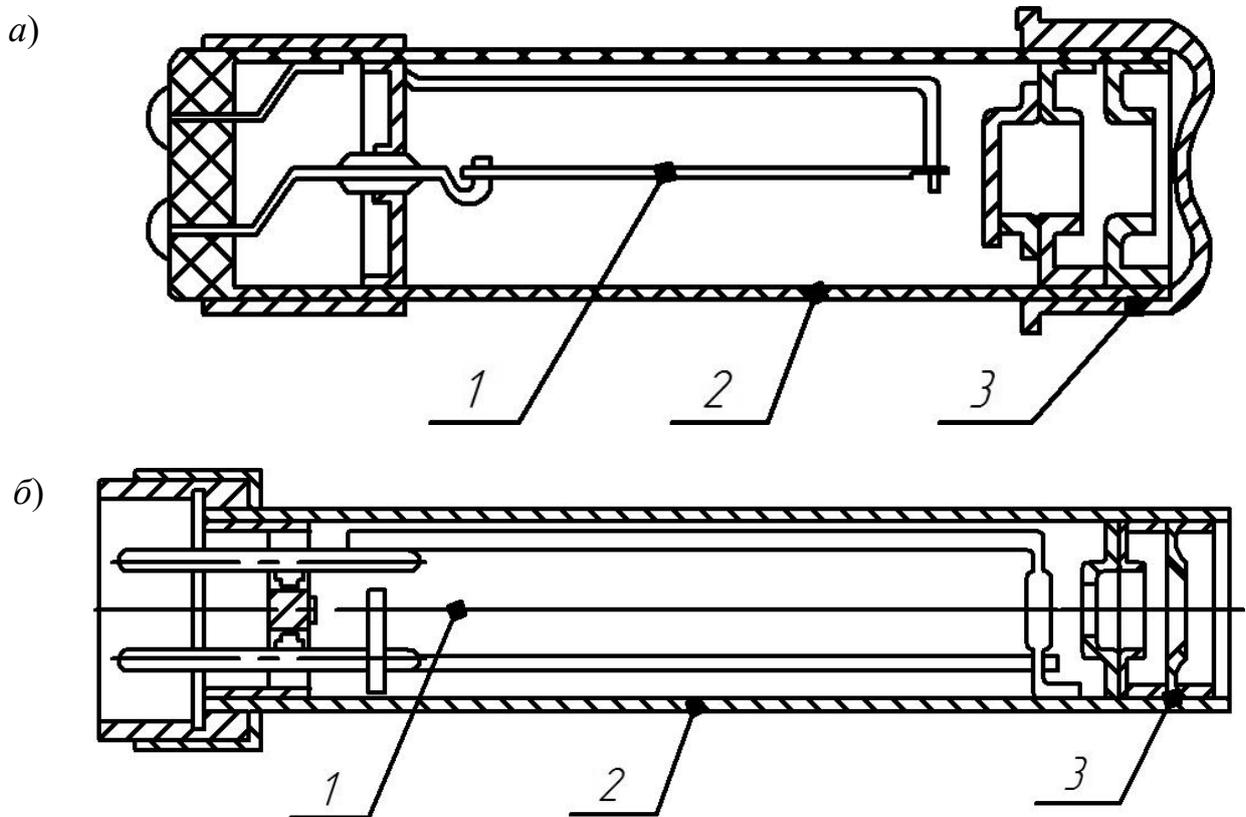


Рисунок 1.6 – Схема включения преобразователя сопротивления



1 – нить из платины; 2 – корпус; 3 – крышка

Рисунок 1.7 – Преобразователи сопротивления ПМТ-2 (*a*) и ПМТ-6-3 (*б*)

Оба преобразователя могут работать как в режиме постоянного тока накала, так и в режиме с постоянной температурой нити.

Преимуществом тепловых преобразователей является то, что они измеряют общее давление всех газов и паров, присутствующих в вакуумной системе, и обеспечивают непрерывность измерений давлений. Инерционность, связанная с тепловой инерцией нити, измеряется от нескольких секунд при низких давлениях до нескольких миллисекунд при высоких давлениях.

При использовании в программно-управляемом оборудовании тепловые преобразователи подключаются к измерительным устройствам с выводом информации на дисплей.

**Электронные преобразователи.** Принцип действия электронных преобразователей основан на пропорциональности между давлением и ионным током, образовавшимся в результате ионизации термоэлектронами остаточных газов.

Существует три схемы электронных преобразователей – прямопролетный, с внешним коллектором и с внутренним коллектором. Прямопролетный преобразователь применяется только для измерения низкого вакуума.

Схема с внутренним коллектором аналогична обычному триоду. Коллектором ионов является сетка, на которую относительно катода подается отрицательное напряжение в несколько десятков вольт, а на анод – положительное напряжение 100...200 В. Электроны на пути от катода к аноду соударяются с молекулами остаточных газов, и образовавшиеся положительные ионы попадают на сетку, создавая ионный ток, измеряемый гальванометром. Недостаток такой схемы – низкая чувствительность при высоком вакууме.

В третьей схеме с внешним коллектором потенциалы сетки и анода меняются местами, и коллектором становится анод. Электроны, летящие от катода к сетке, совершают вокруг ее витков ряд колебаний, что увеличивает траекторию электронов и повышает степень ионизации молекул остаточных газов.

Это делает схему более чувствительной.

Схематично конструкция электронного преобразователя с внешним коллектором приведена на рисунке 1.8.

Ионизационный преобразователь с внешним коллектором ПМИ-2 действует следующим образом. Накаленный прямым пропусканием тока термокатод испускает электроны. Электроны ускоряются в пространстве между термокатодом и сеткой-анодом, на которую подается напряжение  $\sim 100$  В. Большинство электронов пролетает сетку, попадая в замедляющее электрическое поле. Затем, приобретая скорость в направлении к аноду, электроны вновь пролетают сетку-анод, тормозятся около катода и вновь направляются к аноду. Таким образом, электроны совершают колебательные движения около анода. На своем пути электроны производят ионизацию газа. Положительные ионы, образовавшиеся в пространстве между анодом и коллектором ионов, притягиваются последним. Коллектор находится под нулевым или небольшим отрицательным потенциалом ( $\sim 50$  В). При постоянном токе электронной эмиссии (50 мкА) количество образующихся ионов будет пропорциональным

концентрации молекул газа в пространстве, т. е. давлению. Таким образом, ионный ток коллектора служит мерой давления газа.

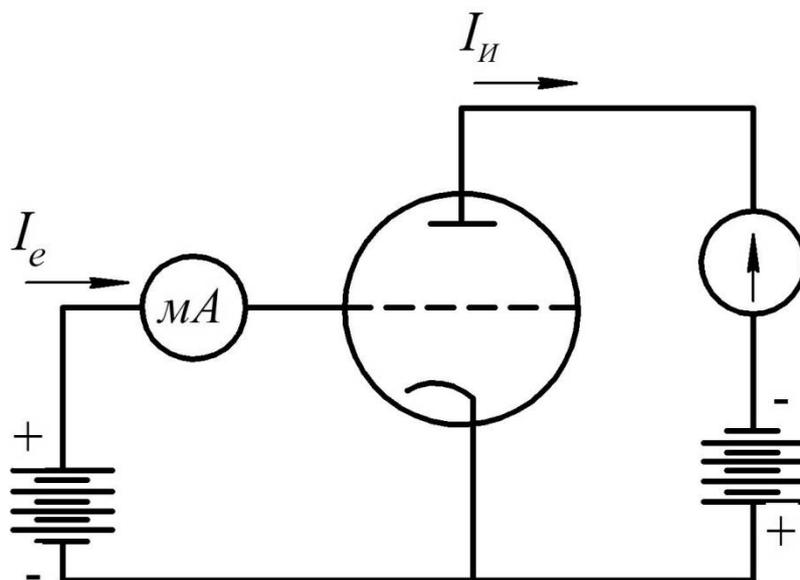


Рисунок 1.8 – Схема электронного преобразователя с внешним коллектором

Коллектор ионов имеет форму цилиндра с электрическим вводом в верхней части баллона и отверстием для подсоединения к вакуумной системе, сетка – форму двойной спирали с двумя выводами для обезгаживания путем пропускания электрического тока.

Термокотод изготовлен из вольфрама. Часто катод изготавливают из оксидов редкоземельных металлов, чтобы он не сгорел при высоких давлениях. В этом случае верхний предел составляет 10 Па по сравнению с 1 Па у вольфрамового. Нижний предел измерения определяется фоновыми токами в цепи коллектора, возникающими из-за эмиссии фотоэлектронов в результате мягкого рентгеновского излучения анодной сетки и ультрафиолетового излучения накаливаемого катода. Для уменьшения фоновых токов предложен преобразователь с осевым коллектором, в котором катод и коллектор поменялись местами.

Для снижения фонового тока уменьшают поверхность коллектора. Отличие этого преобразователя от предыдущего состоит в том, что термокотод и коллектор поменялись местами: одна или две катодные нити (одна запасная) помещены вне сетки, коллектор же ионов в виде тонкой проволоки расположен по оси лампы внутри сетки. В этом случае поверхность коллектора становится очень малой и на нее попадает лишь незначительная часть рентгеновского излучения, посылаемого сеткой. В результате фоновый ток значительно снижается.

Современные датчики высокого вакуума, как правило, совмещают преобразователи для высокого и низкого давления. Контроль вакуума обеспечивается преобразователем сопротивления и ионизационным преобразователем. Такой прибор работает в диапазоне  $10^5 \dots 5 \cdot 10^{-7}$  Па. Корпус вакуумметра – нержавеющая сталь, что дополнительно защищает вакуумметр от

внешних воздействий. В вакуумметре установлены две нити накаливания, при сгорании одной автоматически начинает работать вторая. В случае перегорания обеих нитей накаливания нужно заменить всего лишь «сенсорную» часть вакуумметра, которая составляет  $\sim 30\%$  от стоимости вакуумметра. Вакуумметр имеет съемную электронную часть и может выдержать прогрев до  $180\text{ }^\circ\text{C}$ . Управление вакуумметром и индикация уровня вакуума осуществляются с помощью контроллера вакуумметра. Контроллер и вакуумметр имеют интерфейс RS485, что позволяет легко интегрировать их в систему автоматики [2].

**Магнитные преобразователи.** Принцип действия магнитных преобразователей основан на зависимости тока самостоятельного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях от давления. Электродные системы, обеспечивающие поддержание самостоятельного разряда при высоком и сверхвысоком вакууме, бывают нескольких видов.

Ячейка Пеннинга состоит из двух дисковых катодов *1* и цилиндрического анода *2* (рисунок 1.9, *а*). Электроны движутся по спиральным траекториям между катодными пластинами (рисунок 1.9, *б*).

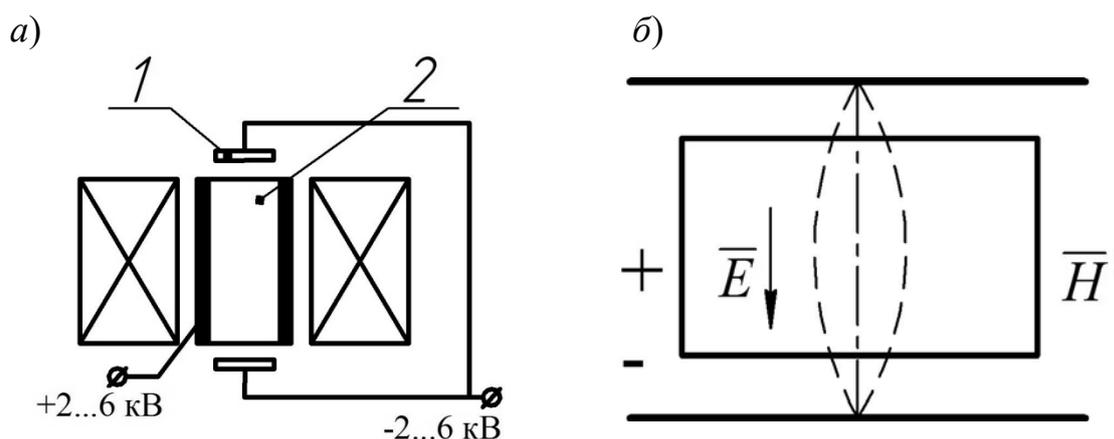


Рисунок 1.9 – Ячейка Пеннинга

В магнетронном преобразователе (рисунок 1.10, *а*) в отличие от ячейки Пеннинга катоды соединены между собой центральным стержнем.

В инверсно-магнетронном преобразователе (рисунок 1.11, *а*) центральный стержень выполняет роль анода, а наружный цилиндр становится катодом.

Все электроды находятся в постоянном магнитном поле, на анод подается положительное относительно катода напряжение  $2\text{...}6\text{ кВ}$ , катод заземлен. Электроны, вылетающие из катода в результате автоэлектронной эмиссии, в магнетронном преобразователе движутся в скрещенных электрическом и магнитном полях по циклоиде (рисунок 1.10, *б*), а в инверсно-магнетронном преобразователе – по гипоциклоиде (рисунок 1.11, *б*). При соударении с молекулой остаточного газа электрон теряет часть своей энергии на ее ионизацию и перемещается в радиальном направлении к аноду. Положительные ионы, образовавшиеся в результате столкновения с электронами, движутся к катоду. Так как их масса значительно больше массы электрона, то магнитное

поле практически не влияет на траекторию движения ионов. Соударение положительных ионов с катодом приводит к появлению вторичных электронов, ток которых пропорционален ионному току. Инверсно-магнетронный преобразователь является более чувствительным, т. к. траектория движения электрона самая протяженная.

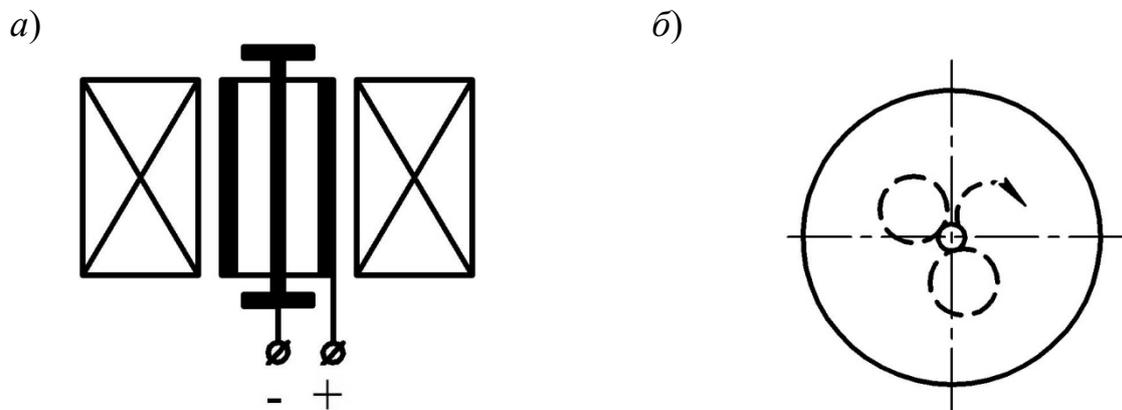


Рисунок 1.10 – Магнетронный преобразователь

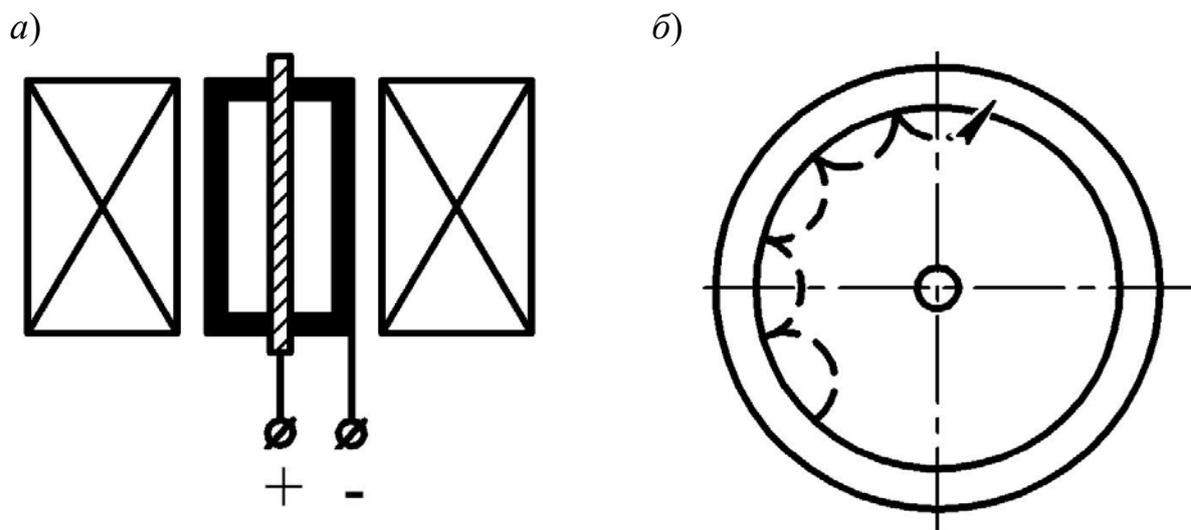


Рисунок 1.11 – Инверсно-магнетронный преобразователь

Таким образом, разрядный ток магнитного преобразователя

$$I_p = I_\phi + I_H + I_B, \quad (1.7)$$

где  $I_\phi$  – фоновый ток, обусловленный автоэлектронной эмиссией;

$I_H$  – ионный ток;

$I_B$  – ток вторичной электронной эмиссии.

Ток автоэлектронной эмиссии не зависит от давления, и им можно пренебречь. Тогда

$$I_H + I_B = ap^n, \quad (1.8)$$

где  $a = 10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ А/Па}$ ,  
 $n = 1 \dots 4$ .

Ток разряда магнитного преобразователя также можно выразить как

$$I_p = K_{II} p, \quad (1.9)$$

где  $K_{II}$  – чувствительность преобразователя (паспортная характеристика);  
 $p$  – давление.

Верхний предел измерений 10...1000 Па ограничивается значением балластного сопротивления преобразователя, предотвращающего дуговой разряд. Нижняя граница измерений доходит до  $10^{-11}$  Па [3].

### ***1.3 Методика проведения лабораторной работы***

При проведении лабораторной работы используется вакуумметр ВИТ-2 (или другой модели). Лабораторная установка представляет собой вакуумную систему, оснащенную вакуумметром с преобразователями. Для проведения экспериментов стеклянные колбы преобразователей должны быть запаянными.

Рабочий ток подогревателя определяется для каждого преобразователя ПМТ-2 в отдельности в связи с их конструктивными особенностями (различная длина нити подогревателя, ее сопротивление, диаметр преобразователя и т. д.). Для этого перед соединением преобразователя с вакуумной системой (до его вскрытия) проводится процесс измерения рабочего тока исходя из условия, что давление в предварительно откачанном и запаянном преобразователе равно  $10^{-4}$  мм рт. ст.

### ***1.4 Порядок выполнения лабораторной работы***

1 Определить рабочий ток термопарного преобразователя ПМТ-2. Измерение рабочего тока производится следующим образом:

- соединить преобразователь ПМТ-2 с соответствующим разъемом вакуумметра ВИТ-2;
- тумблер «Сеть» термопарной части вакуумметра перевести по направлению стрелки, при этом должна загореться сигнальная лампочка;
- установить переключатель «Измерение – Ток нагревателя» в положение «Измерение» и резистором «Ток нагревателя» установить стрелку измерительного прибора на конец шкалы;
- установить переключатель в положение «Ток нагревателя» и по нижней шкале измерительного прибора отсчитать ток в миллиамперах – рабочий ток испытуемого преобразователя.

2 Измерить давление термопарным преобразователем ПМТ-2:

- включить на вакуумной установке режим создания предварительного вакуума в камере установки;
- тумблер «Сеть 220 В» термопарной части вакуумметра ВИТ-2 установить по направлению стрелки, при этом должна загореться сигналь-

ная лампа;

- установить по нижней шкале прибора (термопарной части) рабочий ток нагревателя, указанный на баллоне преобразователя;

- установить переключатель «Измерение – Ток нагревателя» в положение «Измерение» и произвести отсчет показаний по верхней шкале прибора (100 делений соответствует 10 мВ), измерения провести в течение 10 мин, показания отсчитывать через каждые 30 с;

- построить графическую зависимость показаний в милливольтгах от времени откачки камеры вакуумной установки,

- построить зависимость давления в камере вакуумной установки от времени откачки, для перевода показаний в милливольтгах в показания в миллиметрах ртутного столба использовать график, приведенный на рисунке 1.5.

### 3 Измерить давление ионизационным преобразователем ПМИ-2:

- подсоединить запаянный преобразователь ПМИ-2 к разъему вакуумметра;

- установить тумблеры «Сеть 220 В» и «Накал» в положение, указанное стрелкой «Включено», при этом должна загореться сигнальная лампочка;

- через 3...5 мин, когда появится отсчет на приборе, ручкой «Установка нуля» перевести стрелку прибора на нуль;

- установить переключатель «Род работы» в положение «Установка эмиссии» и резистором «Установка эмиссии» по стрелочному прибору установить ток эмиссии катода 0,5 мА (50 делений);

- установить переключатель «Род работы» в положение «Прогрев», прогревать сетку-анод ионизационного преобразователя необходимо в течение 2...5 мин;

- установить переключатель «Род работы» в положение «Обезгаживание», обезгаживание производить в течение 5...10 мин;

- переключатель «Множитель шкалы» установить в положение, при котором отсчет по шкале прибора, измеряющего ионный ток преобразователя будет достаточно приемлем и соизмерим со шкалой прибора.

Величина ионного тока в микроамперах определяется как произведение отсчета по прибору и соответствующего множителя переключателя «Множитель шкалы». Например, отсчет по прибору – 25 делений, а переключатель «Множитель шкалы» находится в положении « $10^{-3}$ ». Давление в системе, соответствующее данному ионному току ионизационного преобразователя, определяется по формуле

$$P = \frac{I_i}{K}, \quad (1.10)$$

где  $P$  – давление, Па;

$I_i$  – ионный ток преобразователя, А;

$K$  – чувствительность преобразователя, А/Па (приводится в паспорте преобразователя при токе эмиссии катода 0,5 мА).

Ионный ток при этом составляет  $2,5 \cdot 10^{-2}$  мкА. Чувствительность преобразователя ПМИ-2 при токе эмиссии 0,5 мА равна  $1 \cdot 10^{-3}$  А/мм рт. ст. Следовательно, давление в системе составит  $2,5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.

4 Изучить конструкцию манометрического магнитного преобразователя, для чего необходимо, используя отвертку, разобрать его на составные части.

5 Провести анализ полученных результатов.

6 Составить отчёт.

### ***1.5 Содержание отчёта***

Отчёт по лабораторной работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- название лабораторной работы;
- цель работы;
- описание конструкции и принципа действия преобразователей;
- результаты измерений, расчета и графические зависимости;
- выводы.

### ***Контрольные вопросы***

1 Какие основные типы манометров и диапазоны измеряемых ими давлений Вы знаете?

2 В чем заключается принцип работы термпарного манометрического преобразователя?

3 В чем заключается принцип работы теплового манометрического преобразователя на основе преобразователя сопротивления?

4 В чем заключается принцип работы ионизационного манометрического преобразователя?

5 Чем ограничены нижний и верхний пределы измерений ионизационного манометра?

6 Почему чувствительность ионизационного манометра зависит от рода газа?

7 Какие виды магнитных преобразователей Вы знаете?

## **2 Исследование вольт-амперной характеристики в зависимости от давления в вакуумной камере**

**Цель работы:** ознакомление с устройством и конструкцией вакуумной установки, освоение методики построения вольт-амперной характеристики (ВАХ).

### ***2.1 Оборудование, инструменты и приборы***

- 1 Объекты исследования – получение ВАХ вакуумного промежутка.
- 2 Вольтметр.
- 3 Амперметр.

### ***2.2 Теоретические сведения***

Электрическим током называют упорядоченное движение электрических зарядов. Понятие вакуума существенно опирается на представление о длине свободного пробега частиц. Под длиной свободного пробега подразумевается среднее расстояние, которое частица может пролететь, не сталкиваясь с другими.

Говорят, что в данном сосуде находится вакуум, если средняя длина свободного пробега находящихся в нем частиц превышает размеры этого сосуда. Вакуум можно создать либо уменьшением количества частиц в сосуде (при этом уменьшается давление в нем), либо уменьшением размеров сосуда. Для рассмотрения примем ток в электровакуумных приборах, которые, как известно, имеют существенные размеры.

Конечной целью рассмотрения является получение вольтамперной характеристики вакуумного промежутка. Под вольт-амперной характеристикой подразумевается зависимость электрического тока, протекающего через вакуумный промежуток, от напряжения на этом промежутке. Обычно вольт-амперную характеристику задают в виде графика.

Как следует из определения вакуума, количество носителей электрического заряда в нем исчезающе мало. Поэтому в своем естественном состоянии вакуумный промежуток ток почти не проводит. Для того чтобы возбудить электрический ток в вакуумный промежуток, необходимо внедрить электрические заряды. Носителями электрического заряда обычно выступают или электроны, или ионы. Если внедрить в вакуумный промежуток большое количество ионов, то вакуума в нем уже не останется. Именно поэтому для создания электрического тока в вакууме используют электроны.

Источником почти неограниченного количества электронов может служить металл. Энергия ионизации атомов металла мала. Поэтому уже при комнатной температуре все они оказываются ионизированными. Таким образом, металл представляет собой ионную кристаллографическую решетку,

внутри которой перемещаются свободные электроны. Их принято называть электронным газом.

Испускание электронов поверхностью металла называют электронной эмиссией. Для того чтобы возбудить электронную эмиссию, электронам, входящим в состав электронного газа, следует сообщить некоторую энергию. Она называется работой выхода электронов из металла. Происхождение работы выхода несложно понять из рассмотрения рисунка 2.1, на котором условно изображены силы, действующие на электрон, находящийся внутри металла, и электрон, покинувший его поверхность. Равнодействующая сил, действующих на электрон, находящийся внутри металла, в среднем равна нулю. В то же время на электрон, покинувший металл, действует суммарная сила притяжения ионов, расположенных на его поверхности.

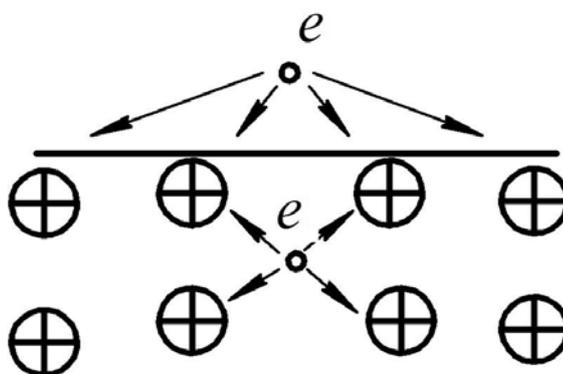


Рисунок 2.1 – Условное изображение сил, действующих на электрон, находящийся внутри металла, и электрон, покинувший его поверхность

Работа, производимая против этих сил, и составляет работу выхода. Работа выхода электронов из металла зависит от свойств металла и в незначительной степени от способа обработки его поверхности.

Для подвода электрического тока к вакуумному промежутку используют два электрода (рисунок 2.2). Отрицательно заряженный электрод называется катодом, а положительно заряженный – анодом.

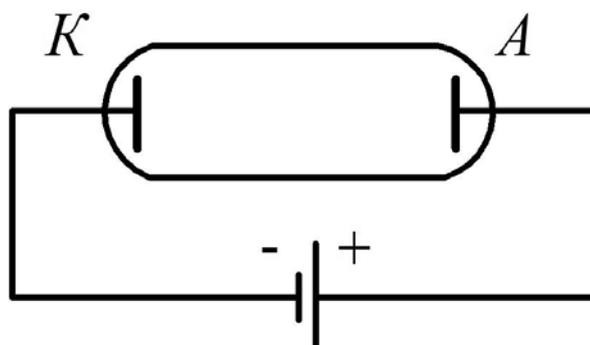


Рисунок 2.2 – Вакуумный промежуток

Очевидно, что источником электронов должен служить катод. Энергию, равную работе выхода, электронам катода можно сообщить различными

способами. Эти способы определяют различные виды электронной эмиссии. Основные из них.

1 *Фотоэлектронная эмиссия.* Энергия сообщается электрону ударяющим его фотоном. Используется в вакуумных фотоэлементах.

2 *Вторичная эмиссия,* когда электрон выбивается из поверхности металла другим электроном, имеющим энергию, превосходящую работу выхода. Вторичная эмиссия используется в фотоумножителях.

3 *Автоэлектронная эмиссия.* Возникает при сильных электрических полях в катоде. Если, проходя длину свободного пробега в металле, электрон за счет работы сил электрического поля приобретет энергию, превышающую работу выхода, то он также сможет покинуть катод. Автоэлектронная эмиссия используется в вакуумно-искровых реле и вакуумных разрядниках.

4 *Термоэлектронная эмиссия.* Использует энергию внутреннего (теплого) движения для сообщения электронам энергии, равной работе выхода. Термоэлектронная эмиссия возбуждается легче всего и поэтому используется в подавляющем большинстве электровакуумных приборов (кинескопах, радиолампах и т. п.).

В работе рассматривается термоэлектронная эмиссия в трехэлектродной лампе триоде. При рассмотрении термоэлектронной эмиссии основную роль играет вопрос о максимальном токе, который при прочих равных условиях может пропустить вакуумный промежуток [7, 8].

Этот ток, очевидно, определяется количеством электронов, способных в единицу времени выйти из катода и достичь анода, это те электроны, энергия которых превысила работу выхода. Скорости электронов, находящихся в металле, различаются и могут принимать значения от очень маленьких до очень больших. Кроме того, скорость каждого отдельного электрона может меняться в результате столкновения с другими электронами и ионами решетки. Тем не менее в равновесном состоянии физические свойства металла не меняются, что свидетельствует о неизменности среднего количества электронов, обладающих данной энергией. Для определения количества электронов, обладающих энергией, лежащей в заданных пределах, используется функция распределения электронов по энергиям. Она определяется в двух видах: нормированная и ненормированная. Ненормированная функция распределения  $f(\varepsilon)$  определена так, что произведение  $f(\varepsilon)d\varepsilon$  представляет собой число электронов  $d_n$ , энергии которых лежат в интервале от  $\varepsilon_0$  до  $\varepsilon_0 + d\varepsilon$ .

$$d_n = f(\varepsilon_0)d\varepsilon, \quad (2.1)$$

Нормированная функция распределения  $F(\varepsilon)$  представляет относительную долю этих электронов, поэтому

$$F(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{d_n}{N}, \quad (2.2)$$

где  $N$  – общее количество электронов в металле.

Распределение частиц газа по энергиям определяется распределением Максвелла

$$f(\varepsilon) = \frac{2N}{\sqrt{\pi}} kT^{-\frac{3}{2}} \sqrt{\varepsilon} \cdot e^{-\frac{\varepsilon}{2kT}}, \quad (2.3)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура газа

Графики распределения Максвелла для двух разных температур изображены на рисунке 2.3. Количество частиц  $n_e$ , энергия которых превышает работу выхода и которые, следовательно, могут покинуть поверхность металла, представлено на рисунке 2.3 заштрихованной площадью, равной

$$n_B = \int_A^{\infty} f(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (2.4)$$

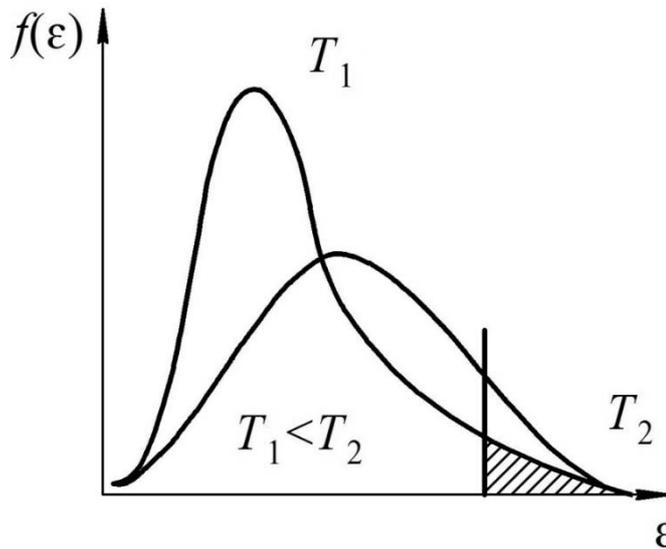


Рисунок 2.3 – Графики распределения Максвелла для двух разных температур

Следует заметить, что электронный газ обладает специфическими квантовыми свойствами и его энергии распределены отнюдь не по Максвеллу. Их распределение известно, как распределение Ферми-Дирака. График функции этого распределения изображен на рисунке 2.4 сплошной линией, пунктирной линией изображен график распределения Максвелла. Как видно из рисунка 2.4, «хвосты» этих распределений, соответствующие большим энергиям частиц, совпадают. Именно такие энергии превышают работу выхода. Поэтому при описании явления термоэлектронной эмиссии с одинаковым успехом используют как распределение Максвелла, так и распределение Ферми-Дирака. Вольт-амперная характеристика вакуумного промежутка изображена на рисунке 2.5.

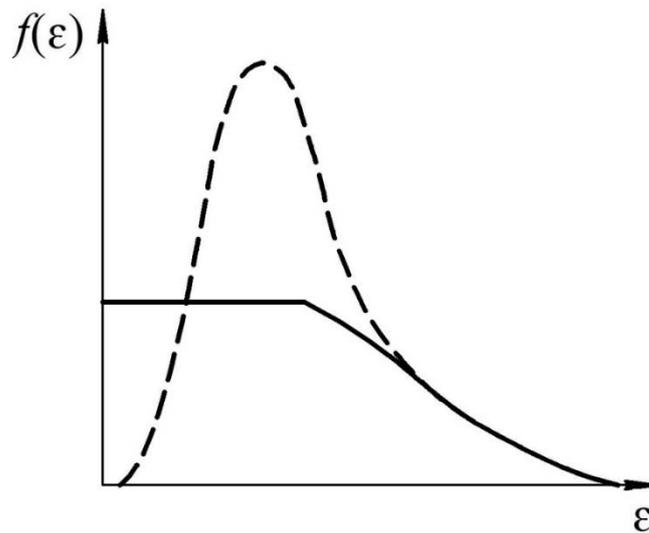


Рисунок 2.4 – Графики распределения Ферми-Дирака

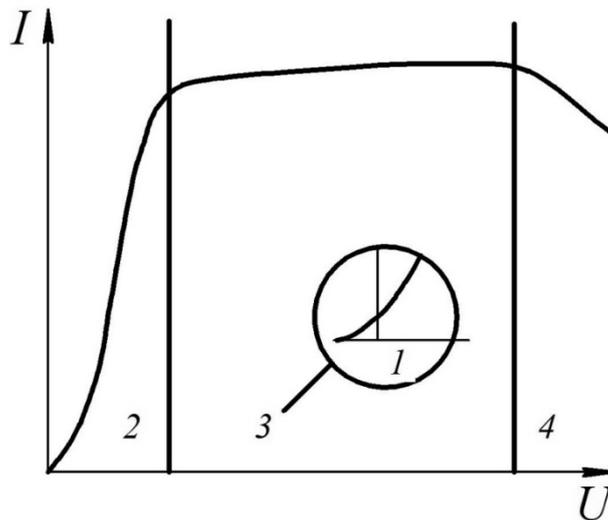


Рисунок 2.5 – Вольт-амперная характеристика вакуумного промежутка

Как видно из рисунка 2.5, эту характеристику четыре качественно различающихся участка. Границы этих участков отмечены тонкими вертикальными линиями. Первый участок находится в начале вольт-амперной характеристики. Он очень мал и на технических вольт-амперных характеристиках не отображается. На рисунке 2.5 этот участок изображен в середине под «увеличительным стеклом», вольт-амперная характеристика вакуумного промежутка выходит не из нуля, а начинается от каких-то небольших отрицательных значений напряжения. Причина этого в том, что катод и анод выполнены из разных металлов и имеют разную температуру. В результате этого количество электронов, испускаемых в единицу времени катодом и анодом, различаются. Катод, как правило, испускает больше электронов. Достигая анода, эти электроны и формируют очень слабый (порядка  $10^{-9}$ А) ток. На участке 2 анодный ток резко возрастает при сравнительно небольшом повышении напря-

жения. Зависимость тока от напряжения при этом оказывается нелинейной. Она описывается законом Богуславского-Ленгмюра, согласно которому

$$I = U^{-\frac{3}{2}}. \quad (2.5)$$

Отклонение от закона Ома в этом случае определяется тем, что электроны, выходящие из катода, способны формировать внутри вакуумного промежутка объемный электрический заряд. Этот заряд препятствует дальнейшему выходу электронов, ограничивая ток, идущий через вакуумный промежуток. Видом участка 2 можно управлять, располагая между катодом и анодом третий электрод-сетку.

При наличии на сетке положительного потенциала объемный заряд, находящийся над катодом, рассасывается и ток, текущий через вакуумный промежуток, увеличивается. Отрицательный потенциал сетки препятствует рассасыванию объемного заряда и может привести к почти полному прекращению анодного тока.

Вакуумное электронное устройство, снабженное такой управляющей сеткой, называют трехэлектродной радиолампой – триодом. Радиолампы на протяжении многих лет составляли основу электроники. В настоящее время они повсеместно вытеснены полупроводниковыми электронными устройствами. Однако принцип работы трехэлектродной радиолампы продолжает использоваться в электронно-лучевых трубках.

На участке 3 вольт-амперной характеристики вакуумного промежутка ток достигает некоторого значения  $I_n$  называемого током насыщения, и при дальнейшем увеличении напряжения почти не изменяется.

Существование тока насыщения обусловлено тем, что количество электронов, способных покинуть катод, ограничено. Катод могут покинуть электроны, энергия которых превышает работу выхода. Их количество может быть определено по формуле (2.4). На графике функции распределения (см. рисунок 2.3) оно отобразится заштрихованной площадью. Очевидно, что при увеличении температуры катода эта площадь увеличится. На рисунке 2.6 это увеличение показано горизонтальной штриховкой. Соответственно, увеличится и ток насыщения вакуумного промежутка. Семейство технических вольт-амперных характеристик вакуумного промежутка изображено на рисунке 2.7.

Величина тока насыщения зависит как от температуры катода, так и от величины работы выхода, которая, как было сказано ранее, в основном определяется материалом катода. На рисунке 2.8 изображена функция распределения частиц по энергиям.  $A_1$  и  $A_2$  – работы выхода электронов из катода. Вертикальная штриховка соответствует большему значению работы выхода электронов из катода, а горизонтальная – меньшему. На рисунке 2.8, как и на рисунке 2.6, с целью упрощения изображены функции распределения Максвелла.

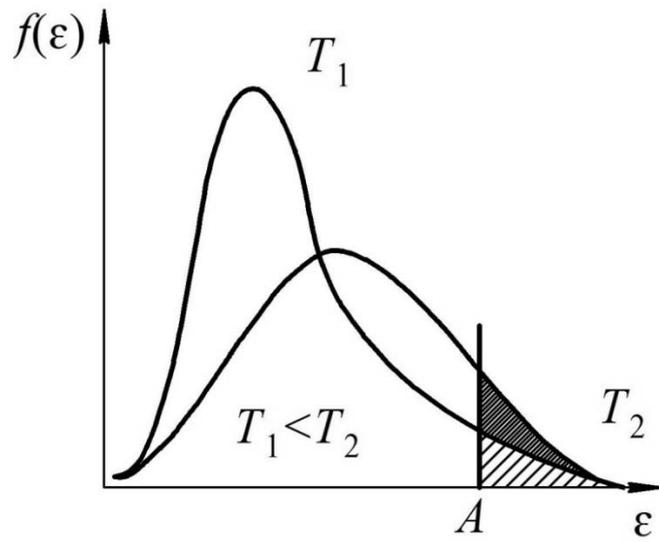


Рисунок 2.6 – График функции распределения

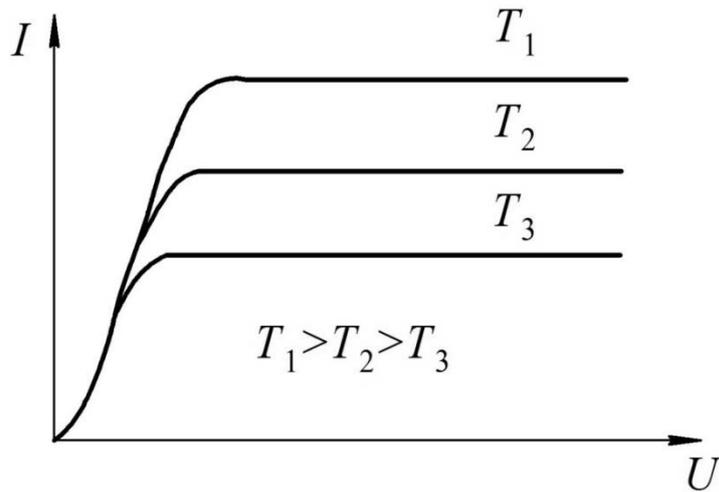


Рисунок 2.7 – Семейство технических вольт-амперных характеристик вакуумного промежутка

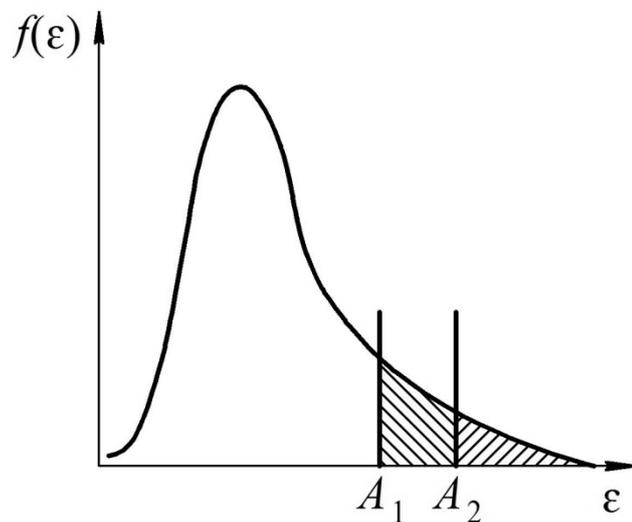


Рисунок 2.8 – Функция распределения частиц по энергиям

Опираясь на такие функции распределения, Ричардсон получил теоретическую формулу, определяющую ток насыщения в вакуумном промежутке. В дальнейшем Дешман повторил рассуждения Ричардсона применительно к распределению Ферми-Дирака. Невзирая на то, что внешне эти формулы существенно различаются, результаты расчетов тока насыщения, произведенные по этим формулам, оказываются идентичными. Это происходит потому, что при температурах катода «хвосты» распределений Максвелла и Ферми-Дирака почти совпадают.

На практике для подогрева катода используют тепло, вырабатываемое при протекании через катод электрического тока. Величина этого тепла определится формулой Ленца-Джоуля

$$Q = \frac{U^2}{R} t, \quad (2.6)$$

где  $Q$  – количество тепла, выделяемое на катоде;

$U$  – напряжение, приложенное к катоду;

$R$  – сопротивление;

$t$  – время протекания тока через катод.

Напряжение, прилагаемое к катоду (напряжение накала), стандартизуют. Обычно величина этого напряжения составляет 6,3 В.

Сделать маленьким сопротивление катода нельзя, т. к. в этом случае будут перегреваться соединительные провода. Действительно, соединительные провода и катод соединены последовательно, как изображено на рисунке 2.9.

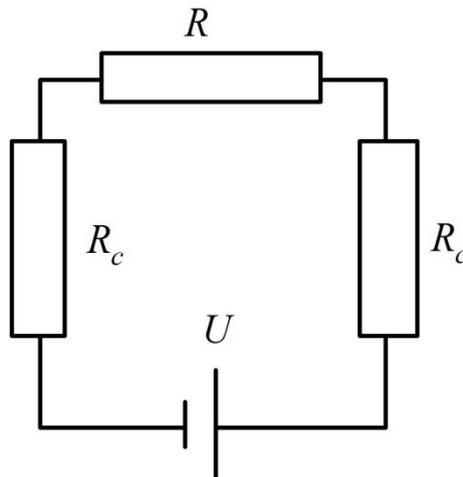


Рисунок 2.9 – Соединительные провода и катод

Если через катод протекает электрический ток силой  $I$ , то мощность  $N_c$ , рассеиваемая на проводах, определится по закону Ленца-Джоуля

$$N_c = I^2 R_c, \quad (2.7)$$

где  $R_c$  – суммарное сопротивление подводящих проводов. Аналогично имеем для мощности, рассеиваемой на катоде, величину

$$N = I^2 R . \quad (2.8)$$

Из соотношений (2.7) и (2.8) следует, что мощности, рассеиваемые на соединительных проводах и катоде, относятся как соответствующие сопротивления:

$$\frac{N}{N_c} = \frac{R}{R_c} . \quad (2.9)$$

Таким образом, для того чтобы разогреть катод, следует сделать большим его сопротивление, а для этого удельное сопротивление катода тоже должно быть большим. В то же время материалы, обладающие большим удельным сопротивлением, например, вольфрам, имеют значительную работу выхода и катод, изготовленный из них, окажется малоэффективным. Сложившееся противоречие разрешается путем изготовления составного подогревного катода (рисунок 2.10). Такой катод состоит из керамического цилиндра 2, на котором намотана вольфрамовая спираль. Эта спираль разогревает никелевый цилиндр 1. Этот цилиндр содержит на своей поверхности дополнительный оксидный слой, имеющий предельно низкую работу выхода.

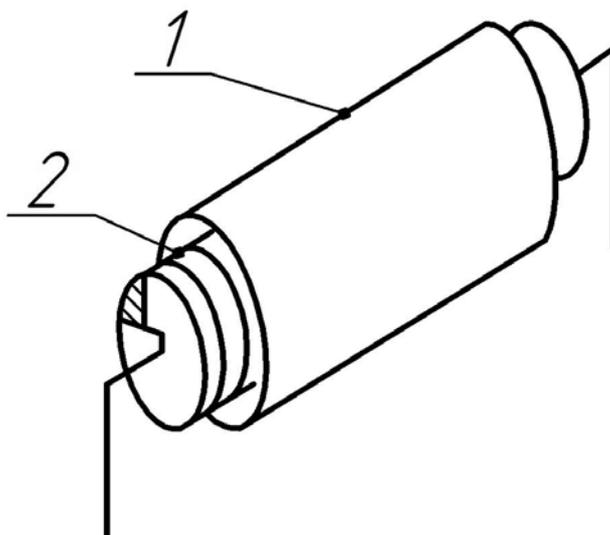


Рисунок 2.10 – Составной подогревной катод

Следует отметить, что ток насыщения не остается постоянным. Он растет, хотя и очень слабо. Этот рост обусловлен автоэлектронной эмиссией электронов из катода. При напряжениях, для которых достигается ток насыщения, вклад автоэлектронной эмиссии в общий анодный ток составляет доли процента. Поэтому на технических вольт-амперных характеристиках (см. рисунок 2.7) току насыщения соответствуют горизонтальные участки.

Уменьшение анодного тока на участке 4 (см. рисунок 2.5) вольт-амперной характеристики вызывается вторичной эмиссией электронов с анода. Действительно, пройдя вакуумный промежуток, на концах которого имеется разность потенциалов  $U$ , электрон приобретает кинетическую энергию

$$\varepsilon = eU . \quad (2.10)$$

При возрастании напряжения на вакуумном промежутке эта энергия может превысить работу выхода электронов с анода. Электроны, выбиваемые с анода, формируют объемный электрический заряд, снижающий величину анодного тока.

В обычных вакуумных промежутках такой спад наблюдается при очень больших значениях анодного напряжения, не достигаемых в бытовых электронных приборах. Поэтому на технических вольт-амперных характеристиках такой спад не отображают. Однако в некоторых многоэлектродных радиолампах спад вольт-амперных характеристик, обусловленный вторичной эмиссией, оказывается существенным. Кроме того, существует ряд специализированных электронных приборов, использующих вторичную эмиссию. Среди них в первую очередь следует указать фотоэлектронные умножители, получившие широкое применение в современной технике.

Строго говоря, понятие «электрическое сопротивление» определено только для проводящих устройств, подчиняющихся закону Ома. Для них оно определяется как коэффициент пропорциональности между силой тока и напряжением

$$R = \frac{U}{I} . \quad (2.11)$$

Однако понятие сопротивления оказалось настолько удобным на практике, что оно было расширено так, что стало применимым к любому проводящему устройству. В случае вакуумного промежутка различают абсолютное сопротивление, определяемое формулой (2.7), и дифференциальное или внутреннее сопротивление, определяемое как

$$R_i = \frac{dU}{dI} . \quad (2.12)$$

Оба этих сопротивления изменяются в зависимости от напряжения, приложенного к вакуумному промежутку (его часто называют анодным напряжением). В качестве технической характеристики часто используют также крутизну вольт-амперной характеристики  $S$ , определяемую как величину, обратную внутреннему сопротивлению.

$$S = \frac{1}{R_i} = \frac{dI}{dU} . \quad (2.13)$$

**Управление электрическим током в вакууме.** Как уже упоминалось, специфика вольт-амперной характеристики вакуумного промежутка во многом определяется возникновением в вакуумном промежутке объемного электрического заряда. Управляя плотностью этого заряда, можно управлять током, протекающим через вакуумный промежуток. Для этого в вакуумный промежуток вводят дополнительный электрод – управляющую сетку. Вакуумная лампа, снабженная управляющей сеткой, называется триодом. Примерная схема включения триода изображена на рисунке 2.11. Между анодом  $A$  и катодом  $K$  вакуумного промежутка прилагается анодное напряжение  $U_A$ . Предельно возможная величина анодного тока ограничивается анодным сопротивлением  $R_d$ . Управляющий потенциал на сетке  $C$  (рисунок 2.11) создается источником  $U_c$ . Дополнительный источник  $U_n$  включен в цепь нити подогрева катода.

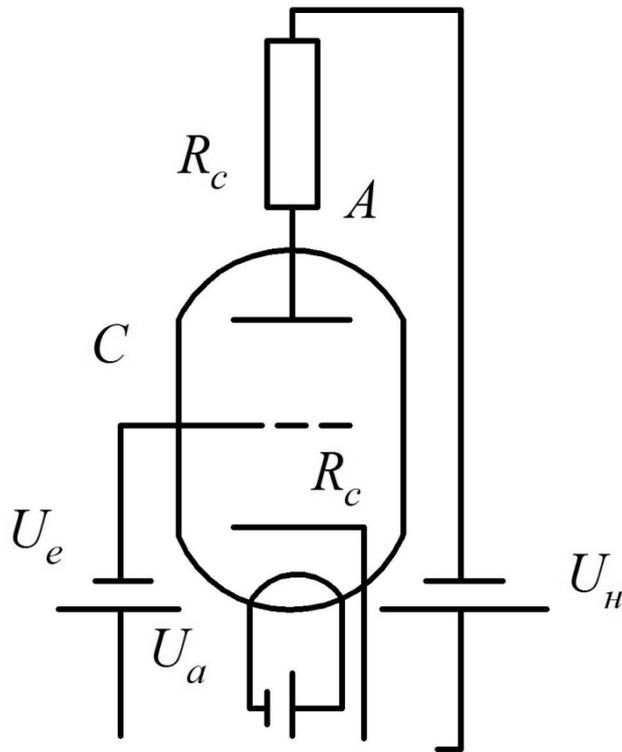


Рисунок 2.11 – Примерная схема включения триода

Потенциалы электродов вакуумной лампы всегда отсчитываются от потенциала катода. Для того чтобы привести потенциал катода к условному нулю, катод, как правило, заземляют.

Принцип управления объемным зарядом представлен на рисунке 2.12, где изображены три параллельные плоскости, представляющие соответственно анод-сетку и катод. Расстояние между анодом и катодом  $L_a$ , а напряжение  $U_a$ . Соответственно, для пары катод-сетка это  $L_c$  и  $U_c$ . Между катодом и сеткой находится электрон  $e$ . На этот электрон действуют разнообразные силы. Однако среди них наибольшую величину  $F$  имеют электрические:

$$F = -eE, \quad (2.14)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$E$  – напряженность электрического поля, в котором находится электрон.

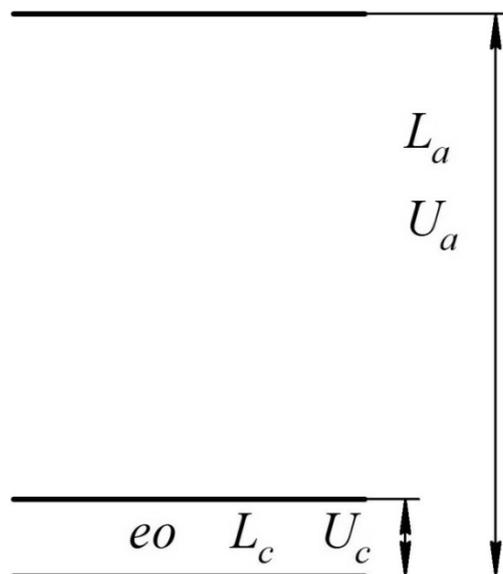


Рисунок 2.12 – Принцип управления объемным зарядом

Для качественного рассмотрения можно предполагать, что поле, создаваемое всеми тремя электродами, мало отличается от поля бесконечной заряженной плоскости. Такое поле является однородным, а его напряженность может быть вычислена по формуле

$$E = \frac{U_a}{L_a} + \frac{U_c}{L_c}. \quad (2.15)$$

Из формулы (2.15) видно, что величина напряженности электрического поля, в котором пребывает электрон, определяется отношением напряжения на электродах к расстоянию между ними. Таким образом, если поместить сетку достаточно близко к катоду, то даже незначительные изменения потенциала сетки могут привести к существенному изменению напряженности электрического поля, в котором находится электрон, и, следовательно, к изменению направления и величины силы, действующей на этот электрон.

Если разность потенциалов между сеткой и катодом положительна, то между ними протекает электрический ток. Его называют сеточным. Поэтому, помимо анодных вольт-амперных характеристик, триод можно охарактеризовать сеточными вольт-амперными характеристиками. Кроме того, триод принято описывать анодосеточными характеристиками. Это зависимость анодного тока триода от разности потенциалов сетка-катод. Анодосеточные характеристики объединяют в семейства с потенциалом анода в качестве параметра. Пример семейства технических анодосеточных характеристик приведен на рисунке 2.13.

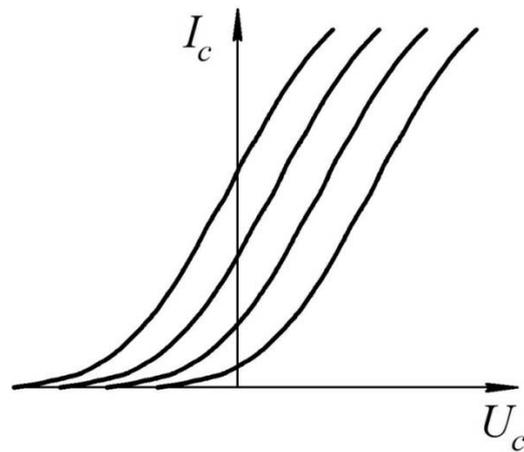


Рисунок 2.13 – Пример семейства технических анодосеточных характеристик

### 2.3 Порядок выполнения работы

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рисунке 2.14. Перечертите ее в свой лабораторный журнал. Следует отметить, что на этой схеме источники питания изображены в виде гальванических элементов, что не соответствует действительности. Это сделано потому, что изображение подлинного блока питания, содержащего трансформатор, выпрямитель и фильтры сильно усложнило бы схему, практически не добавляя ничего к пониманию ее функционирования.

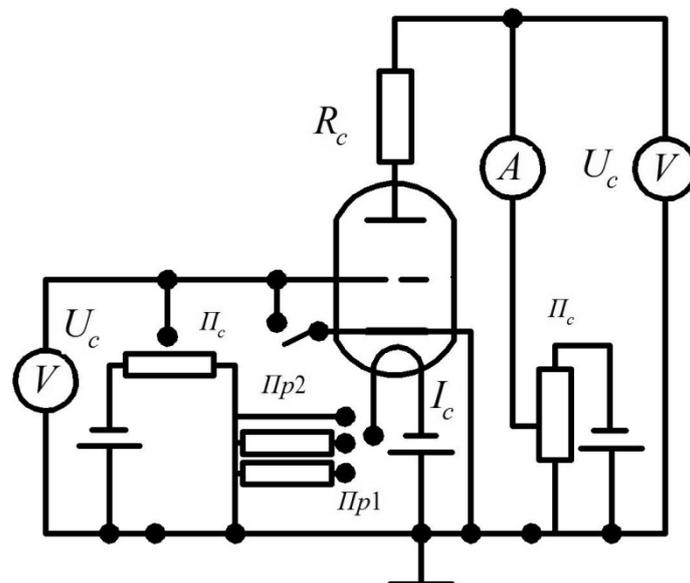


Рисунок 2.14 – Принципиальная схема экспериментальной установки

Питание всех элементов реальной установки осуществляется от единого блока питания. Его включение или выключение осуществляется тумблером «питание». Найдите его на своей установке.

Установка может функционировать в двух режимах: режиме диода и триода. Переключение между этими режимами осуществляется при помощи





### **3.4 Содержание отчёта**

Отчёт по лабораторной работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- название лабораторной работы;
- цель работы;
- описание конструкции и принципа действия вакуумной установки с электромагнитной катушкой;
- результаты измерений, расчета и графические зависимости;
- выводы.

#### **Контрольные вопросы**

1 Чем отличается вольт-амперная характеристика вакуумной установки с электромагнитной катушкой и без нее?

2 Что называют крутизной вольт-амперной характеристики?

3 В каких устройствах используют управление электрическим током в вакууме?

4 Нарисуйте основные силы, действующие на электрон, находящийся между катодом и анодом. Запишите формулы для вычисления этих сил.

5 Что такое вакуумный диод?

## **4 Исследование влияния обработки лазером на различные материалы**

**Цель работы:** изучение физических основ процесса взаимодействия лазерного излучения с веществом, решение уравнения теплопроводности для твердого тела при облучении его лазерным излучением.

### **4.1 Оборудование, инструменты и приборы**

- 1 Технологический комплекс лазерной обработки материалов.
- 2 Комплект деталей из дерева.
- 3 Комплект деталей из пластмассы.
- 4 Комплект деталей из стали.

### **4.2 Теоретические сведения**

Использование лазерной энергии для обработки материалов основано на поглощении лазерного излучения веществом. При взаимодействии с поверхностью материала излучение частично отражается, а частично проникает внутрь материала, поглощается в нем и, как правило, достаточно быстро

переходит в тепло. В этом случае изменение плотности лазерного потока по глубине описывается известным уровнем Бугера:

$$E(x) = E_0 \cdot A \cdot e^{-\alpha x}, \quad (4.1)$$

где  $E(x)$  – световая энергия, проникающая на глубину  $x$ ;

$E_0$  – энергия, падающая на поверхность;

$A$  – поглощательная способность материала;

$\alpha$  – линейный коэффициент поглощения;

$x$  – координата, отсчитываемая от поверхности в глубь материала.

Количество энергии, поглощенной в слое толщины  $\Delta x$ ,

$$|\Delta E(x)| = E_0 \cdot A \cdot e^{-\alpha x} \cdot \Delta x. \quad (4.2)$$

Формула (4.1) применима к различным материалам в широком диапазоне длин волн. В то же время конкретные значения входящих в нее величин  $A$  и  $\alpha$ , а также механизм поглощения лазерного излучения и перехода его в тепло могут сильно отличаться для материалов различных классов. Поглощательная способность материала  $A = (1 - R)$ , где  $R$  – коэффициент отражения, показывает, какая часть энергии падающего излучения поглощается и участвует в процессе нагрева вещества. Поглощательная способность зависит от длины волны излучения, состояния поглощающей поверхности и температуры. Коэффициент отражения для большинства материалов увеличивается с ростом длины волны, что определяет требования к энергетическим характеристикам лазера: лазер с большей длиной волны должен обладать большей мощностью, чем лазер с меньшей длиной волны, для оказания эквивалентного воздействия на начальном этапе поглощения излучения.

Коэффициент отражения зависит также от  $\rho_a$  – среднеарифметического отклонения профиля шероховатости поверхности и в общем случае описывается выражением

$$R = R_0 \exp \left[ - \left( \frac{5\pi\rho_a \cos \varphi}{\lambda} \right)^2 \right]. \quad (4.3)$$

При нормальном падении излучения

$$R = R_0 \exp \left[ - \left( \frac{5\pi\rho_a}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (4.4)$$

где  $R$  – измеряемый коэффициент отражения;

$R_0$  – коэффициент отражения, определяемый по формуле Френеля;

$\lambda$  – длина волны подающегося излучения.

Анализируя эти выражения, можно сделать вывод, что для данной длины волны излучения увеличение шероховатости поверхности (по сравнению с

оптически гладкой ( $\rho_a \leq \lambda$ ) приводит к снижению коэффициента отражения. Для металлов наличие шероховатостей поверхности обеспечивает возрастание резонанса локального поля, обусловленного возбуждением в поверхностных шероховатостях осциллирующих дипольных моментов (электронного газа). Взаимодействуя друг с другом, они образуют коллективные моды, кулоновское поле усиливает поле падающей волны. Таким образом, шероховатости служат аккумуляторами энергии, поступающей из поля падающей волны. Поглощательная способность материала зависит от температуры во время действия потока излучения. В первом приближении зависимость  $A(T)$  может быть представлена в виде

$$A = a + b \cdot T .$$

Для неметаллических материалов возможно падение  $A$  с ростом температуры. Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  температурной зависимости приведены для ряда материалов в справочниках по лазерной технологии. Так, например, для окиси алюминия  $A(T) = 0,77 - 4,28 \cdot 10^{-4} T$ .

В качестве критерия необходимости учета зависимости поглощательной способности от температуры можно использовать параметр

$$\beta = \frac{E_0 \cdot b}{k \sqrt{k_1}} , \quad (4.5)$$

где  $E_0$  – плотность потока падающего излучения;

$k_1$  – коэффициент сосредоточенности теплового источника при гауссовой интенсивности,

$k$  – коэффициент теплопроводности.

При  $|\beta| < 1/5$  учет температурной зависимости дает вклад не более 10 %, следовательно, при расчетах температурную зависимость  $A(T)$  можно не принимать во внимание.

Коэффициент  $\alpha$  в выражении (4.1) характеризует толщину слоя вещества  $\delta = 1/\alpha$ , после прохождения которого интенсивность света уменьшается в  $e = 2,7$  раза.

Для металлов значение  $\alpha$ , как правило, составляет величину  $10^4 \dots 10^5 \text{ см}^{-1}$ , т. е. энергия лазерного излучения в металлах поглощается в приповерхностном слое толщиной  $10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ см}$ . Значение  $\alpha$  зависит от частоты света  $\nu$ , химической природы и состояния вещества. Связь  $\alpha$  с комплексным показателем преломления поглощающего вещества имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{4nk}{\lambda} = \frac{4\pi nk\nu}{c} = \frac{2nk\omega}{c} = \frac{2\omega k}{V} , \quad (4.6)$$

где  $V$  – скорость света в среде,  $V = c/n$ ;

$c$  – скорость света в вакууме;

$n, k$  – оптические характеристики материала.

Для металлов  $k \gg 1$ , поглощение среды в этом случае называют металлическим, если  $k \ll 1$ , поглощение среды типично для диэлектриков. В этом случае обычно полагают

$$\alpha = \frac{2\omega\sqrt{\varepsilon}}{c} = \frac{4\pi\nu\sqrt{\varepsilon}}{c} = \frac{4\pi\sqrt{\varepsilon}}{\lambda}. \quad (4.7)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала.

Говоря о лазерном излучении как источнике энергии в различных технологических процессах, мы должны рассматривать порождаемый им высокотемпературный практически безынерционный источник тепла на поверхности обрабатываемого изделия, зависящий также от энергетических характеристик лазерного излучения.

Энергетический вклад лазерного излучения в различные технологические процессы определяют величины  $q$  и  $\tau$ .

Как известно,

$$E = p \cdot \tau = q \cdot S \cdot \tau, \quad (4.8)$$

где  $E$  – энергия поглощенного излучения;

$p$  – мощность поглощенного излучения;

$\tau$  – время действия излучения;

$q$  – плотность мощности излучения;

$S$  – площадь облучения.

Из (4.8) видно, что увеличение энергетического вклада в технологический процесс достигается увеличением  $q$  или  $\tau$ , однако характер нагрева при этом будет различный.

Высокие скорости нагрева и остывания в зоне действия лазерного излучения характерны для импульсного режима работы лазера: чем более короткий импульс излучения  $\tau$ , тем выше плотность мощности и меньше масса нагреваемого материала. При увеличении длительности импульса, а также в случае непрерывного потока лазерного излучения за счет возрастающей роли теплопроводности нагревается все большая масса материала. При этом реализуются мягкие условия нагрева и «длительного» остывания, определяемого механизмами теплопередачи и теплообмена со средой [4, 5].

Известно, что в результате перехода энергии лазерного излучения в тепло начинается нагревание материала. Перенос тепла в твердом теле осуществляется механизмами теплопроводности, из которых для металлов и сильно выраженных полупроводников основным является электронная теплопроводность, а для неметаллов – решеточная. Превращение поглощенной энергии излучения в тепловую энергию материала происходит почти мгновенно (порядка  $10^{-11}$  с), поэтому температура поверхности материала в область воздействия быстро возрастает, примерно сохраняя распределение плотности мощности в поперечном сечении лазерного пучка. Одновременно

происходит перенос тепла в глубь материала. Для гауссова распределения мощности излучение в фокусе распределения температуры в материале, получаемое в результате теплопроводности, описывается зависимостью

$$T(r, z, t) = \frac{2p}{\rho c (4\pi a)^{3/2}} \int_0^t \frac{1}{(\tau + t)\sqrt{t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at} - \frac{r^2}{4a(t + \tau)}\right) dt, \quad (4.9)$$

температура в центре фокуса лазерного пучка на поверхности материала

$$T(0, 0, t) = \frac{p_0}{\rho c a (4\pi a t)^{1/2}} \operatorname{arctg}\left(\frac{t}{\tau}\right)^{1/2}, \quad (4.10)$$

где  $p_0$  – мощность излучения, введенная в материал через площадку  $s$ ,  $p_0 = q \cdot s$ ;

$$\tau = a/4 r_0^2;$$

$r_0$  – радиус пятна излучения по уровню  $1/e$  от максимальной интенсивности;

$c$  – коэффициент теплопроводности;

$\rho$  – плотность материала;

$a$  – коэффициент теплопроводности;

$t$  – текущее время.

В случае, когда теплоотводом можно пренебречь, температуру поверхности можно определить из уравнения

$$c(T)\rho(T) \frac{dT}{dt} = A(T) \frac{qT}{\delta(T)}, \quad (4.11)$$

где  $c$ ,  $\rho$  – теплоемкость и плотность материала соответственно.

Интегрируя, можно получить выражение для энергозатрат лазерного излучения, обеспечивающих нагрев поверхности до заданного значения  $T^1$  к моменту времени  $t^1$ :

$$E^1(t^1) = \int_0^{t^1} q(t) dt = \int_0^{T^1} f(t) dt = F(T^1), \quad (4.12)$$

где  $f(t) = c(T)\rho(T) \frac{\delta(T)}{A(T)} \geq 0$ .

Выражение (4.11) можно преобразовать к виду

$$T^1 = F^{-1}(E(t^1)). \quad (4.13)$$

### 4.3 Порядок выполнения работы

Следует решить уравнение теплопроводности для твердого тела при облучении его лазерным излучением, используя формулу

$$\frac{\delta T}{\delta t} - a\Delta T = \frac{f(x, y, z, t)}{\rho c},$$

где  $T$  – температура в произвольной точке материала с координатами  $x, y, z$  в момент времени  $t$ ;

$\rho c$  – удельная теплоемкость вещества.

Объемная плотность мощности лазерного излучения задается функцией

$$f(x, y, z, t) = \alpha(x)q(y, z, t) \exp\left(-\int_0^x \alpha(x) dx\right),$$

где  $q(y, z, t)$  – функция, характеризующая распределение плотности поглощения светового потока на поверхности материала и изменение его во времени.

Теплообменом облучаемой поверхности с окружающей средой можно пренебречь. Граничное условие на поверхности ( $x = 0$ )

$$\frac{\delta T}{\delta t}(0, y, z, t) = 0.$$

Облучаемый образец считать полубезграничной средой, имеющей в начальный момент времени температуру  $T_H$ :

$$T(\infty, y, z, t) = T(x, y, z, 0) = T_H.$$

Будем полагать, что  $T_H = 0$ . Излучением равномерно освещается вся поверхность материала, и плотность поглощенного светового потока не меняется со временем, т. е.

$$f(x, y, z, t) = \alpha \cdot q \cdot \exp(-\alpha x).$$

Необходимые параметры и характеристики для решения уравнения даются преподавателем.

#### **4.4 Содержание отчёта**

Отчёт по лабораторной работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- название лабораторной работы;
- цель работы;
- описание конструкции и принципа действия лазера, процесса взаимодействия лазерного излучения с веществом;
- результаты измерений, расчета и графические зависимости;
- выводы.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Основные физические процессы при взаимодействии лазерного излучения с веществом.
- 2 Влияние оптических постоянных материала на характер взаимодействия с лазерным излучением.
- 3 Нагрев материалов лазерным излучением с учетом теплофизических коэффициентов.
- 4 Нагрев твердых материалов лазерным излучением с различными временными и энергетическими характеристиками.

## **5 Исследование влияния инструмента, модифицированного тлеющим разрядом, на шероховатость поверхности**

***Цель работы:*** исследование влияния величины подачи, радиуса закругления вершины резца и способа упрочнения инструмента на шероховатость поверхности при токарной обработке.

### ***5.1 Оборудование, инструменты и приборы***

- 1 Объекты исследования – комплект цилиндрических деталей.
- 2 Набор проходных токарных резцов.
- 3 Контрольно-измерительные средства – угломеры, штангенциркули, металлические линейки, шаблоны, набор эталонов шероховатости поверхности.
- 4 Токарно-винторезный станок.

### ***5.2 Теоретические сведения***

Поверхность любой детали никогда не бывает абсолютно гладкой. От степени её шероховатости многое зависит в эксплуатации машины. Шероховатости первыми «вступают в борьбу» с трением, смятием, принимают на себя удары другого твёрдого тела, контактируют с агрессивными средами. Шероховатости в значительной мере определяют оптические, акустические, электрические, магнитные и другие свойства деталей.

Практически нет ни одной эксплуатационной характеристики машины, которая в той или иной степени не зависела бы от шероховатости поверхностей деталей. Какой должна быть шероховатость, чтобы наилучшим образом сопротивляться износу, трению, обеспечивать прочность, герметичность и многие другие свойства?

Зависимости эти весьма сложны, и установить их удаётся лишь экспериментально. При проектировании деталей машин в основном приходится иметь дело со случаями, когда одинаково плохи как слишком шероховатые, так и слишком гладкие поверхности.

Детали, трущиеся в процессе работы машины, смазывают для уменьшения износа. От вида смазки, её количества и способа подачи зависят все главные характеристики машины. Но для получения хороших характеристик работы недостаточно обеспечить обильную подачу высококачественной смазки. Трущиеся поверхности должны иметь ещё и собственные резервуары для размещения и удержания смазывающих веществ – масляные карманы. Роль этих карманов выполняют впадины микрорельефа, образованные неровностями поверхности – её шероховатостями. Поверхность с большими по высоте неровностями (карманы велики) удерживает достаточно масла, но её способность воспринимать нагрузки незначительна: с сопрягаемой поверхностью контактирует лишь небольшое число выступов; возникают значительные удельные давления; поверхность интенсивно изнашивается (рисунок 5.1). Если же на поверхности много неровностей, но высота их мала, то, наоборот, несущая способность велика, а смазки удерживается мало, т. к. масляные карманы малы, и в результате снова ускоренный износ [5, 6].

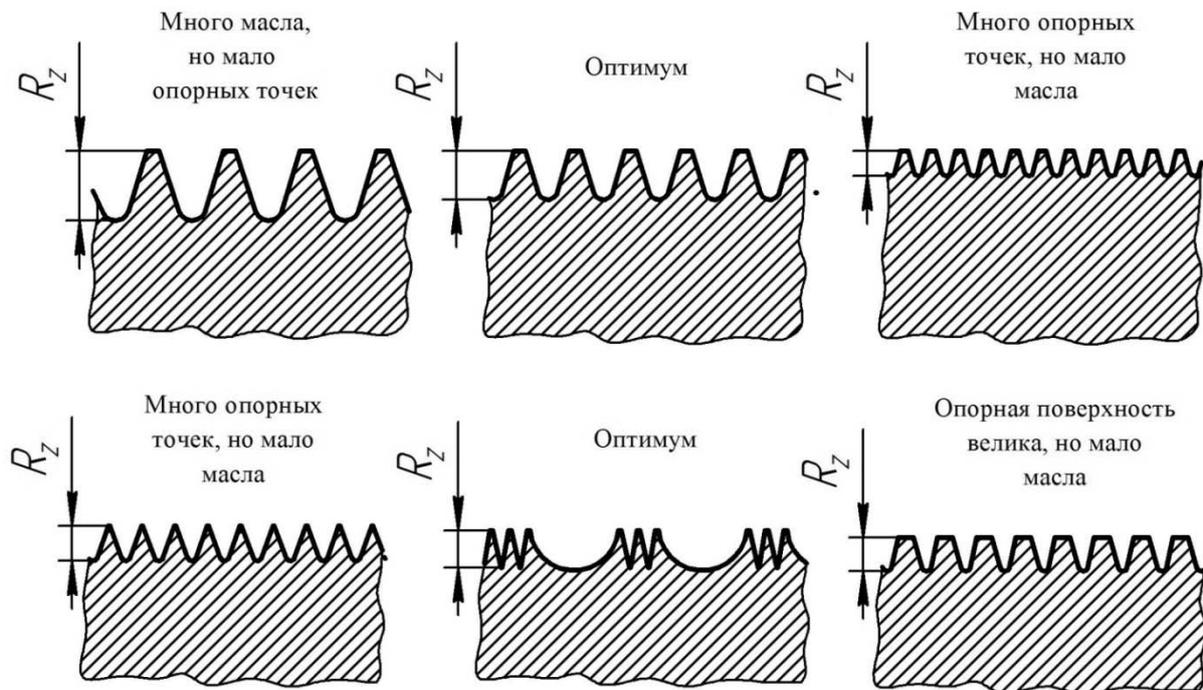


Рисунок 5.1 – Взаимосвязь шероховатости и маслоёмкости поверхности

Шероховатость чаще всего определяется одним из двух параметров (ГОСТ 25142–82): средним арифметическим отклонением профиля  $R_a$  и высотой неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$ .

$R_z$  – это сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины (рисунок 5.2).

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + |H_{i \min}|}{5}, \quad (5.1)$$

где  $H_{i \max}$  – высота  $i$ -го наибольшего выступа профиля;  
 $H_{i \min}$  – высота  $i$ -й наибольшей впадины профиля.

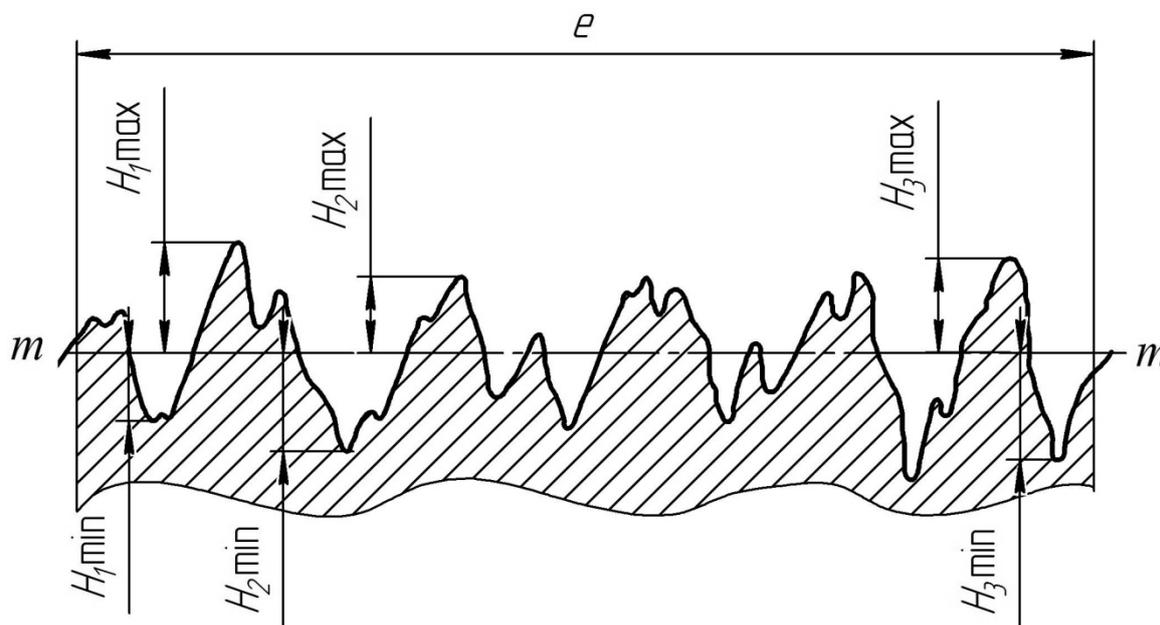


Рисунок 5.2 – Схема измерения параметра  $R_z$

Базовая длина  $l$  участка поверхности, выбираемая для измерения шероховатости, задаётся ГОСТом.

Шероховатость поверхности зависит от подачи  $S$ , мм/об, геометрических параметров режущего инструмента, вибраций, возникающих в процессе резания, скорости резания  $V$ , м/мин, глубины резания  $t$ , мм, и т. д. Наибольшее же влияние на величину микронеровностей при обработке на токарных станках оказывают величина подачи и такие параметры геометрии резца, как углы резца в плане и радиус закругления вершины резца  $r$ , мм.

### 5.3 Порядок выполнения работы

Оставляя постоянным один из двух исследуемых факторов, например, подачу, изменяют второй – радиус при вершине и, обтачивая заготовку при различных значениях этого переменного фактора, находят соответствующие значения величины шероховатости, затем поступают наоборот. При исследовании влияния каждого из двух факторов рекомендуется определить не менее трёх-четырёх значений шероховатости для каждого из принятых факторов. Результаты экспериментов заносят в таблицу и строят графики, определяющие зависимость шероховатости от радиуса закругления вершины резца и величины подачи ( $R_z = f(S)$ ,  $R_z = f(r)$ ).

Ознакомиться с основными положениями о влиянии шероховатости поверхности на характеристики поверхностей трения.

Измерить диаметр заготовки (рисунок 5.3) и определить частоту вращения шпинделя по формуле

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D},$$

где  $n$  – частота вращения шпинделя, об/мин;

$V$  – скорость резания, заданная преподавателем, м/мин;

$D$  – диаметр заготовки, мм.

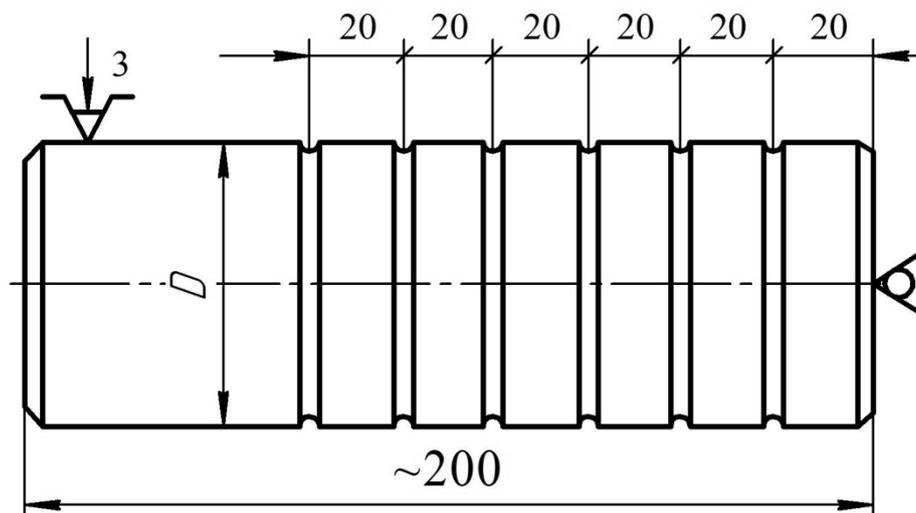


Рисунок 5.3 – Эскиз заготовки

Провести эксперимент при глубине резания 0,5 мм и занести все данные в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Данные к эксперименту

Номер опыта	$S$ , мм/об	$r$ , мм	Значения $R_z$ , мкм
1	0,2	1	
2	0,2	3	
3	0,2	6	
4	1,0	1	
5	0,5	1	
6	0,1	1	

*Примечание* – Опыты 1–3 проводятся для определения зависимости  $R_z$  от величины радиуса закругления вершины резца; опыты 4 – 6 – от величины подачи.

Определить высоты неровностей  $R_z$  методом сравнения с эталонами шероховатости.

Аналогично провести исследования с инструментом модифицированным тлеющим разрядом.

Построить графики, определяющие влияние подачи и радиуса закругления вершины резца на шероховатость поверхности:  $R_z = f(S)$ ,  $R_z = f(r)$ .

### 5.4 Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- название лабораторной работы;
- цель работы;
- основные положения о шероховатости поверхностей и её влияние на эксплуатационные характеристики деталей трения;
- таблица параметров проведения эксперимента и его результатов;
- графики зависимости параметра  $R_z$  от подачи и закругления вершины резца;
- выводы.

### Контрольные вопросы

- 1 На какие свойства деталей оказывает влияние шероховатость?
- 2 Что такое параметр  $R_z$ ?
- 3 Что такое маслоёмкость поверхности?
- 4 От каких параметров зависит шероховатость поверхности?
- 5 Почему шероховатость поверхности зависит от величины подачи и радиуса закругления вершины резца (изобразить схематически)?

### Список литературы

- 1 **Розанов, Л. Н.** Вакуумная техника / Л. Н. Розанов. – Москва : Высшая школа, 2007. – 391 с.
- 2 Вакуумные системы технологического оборудования : учебник / Л. В. Кожитов [и др.]. – Москва : Руда и металлы, 2002. – 455 с.
- 3 Вакуумная техника : справочник / К. Е. Демихов [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2009. – 509 с.
- 4 **Рыкалин, Н. Н.** Лазерная обработка материалов / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Н. Кокора. – Москва: Машиностроение, 1975. – 296 с.
- 5 Лазеры в технологии / Под ред. М. Ф. Стельмаха. – Москва: Энергия, 1975. – 216 с.
- 6 **Аршинов, В. А.** Резание металлов и режущий инструмент / В. А. Аршинов, Г. А. Алексеев. – Москва: Машиностроение, 1968. – 500 с.
- 7 **Ящерицин, П. И.** Основы резания материалов: учебное пособие / П. И. Ящерицин, В. Д. Ефремов. – Минск: БГАТУ, 2008. – 644 с.
- 8 **Попов, А. Н.** Вакуумная техника: учебное пособие / А. Н. Попов. – Москва: ИНФРА-М; Минск: Новое знание, 2018. – 167 с.
- 9 Методики определения параметров вакуумных систем: лабораторный практикум / С. Л. Григорович [и др.]; под ред. Г. Д. Кузнецова. – Москва: ИД МИСиС, 2002. – 75 с.