

# Лабораторная работа №1

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНА ПАШЕНА

### 1.1. Теория процесса

Если к электродам, между которыми находится диэлектрик, приложить возрастающее во времени напряжение, то при некотором его значении в промежутке появляется канал высокой проводимости или весь промежуток становится проводящим (разряд в газе при низком давлении). Это явление получило название пробоя, а напряжение источника, при котором наблюдается явление пробоя, – пробивного ( $U_{пр}$ ).

Пробой – крайне опасное явление, возникающее при эксплуатации электрооборудования. Чтобы разработать надежную изоляцию – основного компонента любого электрооборудования – надо знать закономерности пробоя различных диэлектриков в условиях эксплуатации. Широкие исследования ведутся в области газового разряда, так как процессы, происходящие при разряде в газах, используются в различных разрядниках, в газоразрядных трубках, электрофильтрах, в устройствах по получению и использованию плазмы, в устройствах по осуществлению термоядерного синтеза и т. д.

При приложении к промежутку между электродами электрического поля и в газе возникают процессы ионизации, в результате которых в промежутке образуются электроны и положительные ионы, движущиеся соответственно к аноду и катоду и создающие электрический ток между электродами. Но прохождение этого тока прекращается, как только все заряды нейтрализуются на электродах. Этот процесс еще нельзя назвать пробоем, так как он не стационарный. Чтобы он был непрерывным, необходим источник, постоянно поставляющий электроны для следующих актов ионизации, т. е. внешний ионизатор. Внешним ионизатором могут служить космическое излучение, излучение при радиоактивном распаде, источник коротковолнового излучения (вакуумный ультрафиолет,  $\gamma$ -лучи) и др.

Разряд, существующий при поддержке внешнего ионизатора, вызывающего возникновение свободных электронов, называется несамостоятельным.

*Критерием пробоя промежутка является выполнение условия самостоятельности разряда.* Самостоятельным называется разряд, в котором появление заряженных частиц, необходимых для поддержания разряда, обусловлено ионизационными процессами, происходящими в самом газовом промежутке и на поверхности катода без облучения его посторонним источником излучения.

Процесс ионизации газа электронами и положительными ионами характеризуется **тремя коэффициентами**, которые ввел в своей теории газового разряда английский физик Дж. Таунсенд:

**1.  $\alpha$**  – коэффициент ударной ионизации электронами, т. е. число свободных электронов, образуемых одним электроном на 1 см пути от катода к аноду при столкновении его с нейтральными атомами и молекулами.

Выражение для параметра  $\alpha$  может быть получено при следующих допущениях:

а) электрон способен осуществить ионизационный процесс только тогда, когда его кинетическая энергия  $W_k$  равна или превышает энергию ионизации  $W_{и}$ , т. е. для появления пары носителей зарядов необходимо выполнение условия:

$$\left( \frac{m \cdot V^2}{2} \geq W_{и} \right), \quad (1.1)$$

где  $m$  – масса электрона;  $V$  – скорость электрона;

б) электрон набирает энергию только на длине свободного пробега  $\lambda$  и полностью ее теряет при соударениях с молекулами и атомами;

в) электрон движется вдоль силовых линий электрического поля.

Число ионизирующих столкновений на единице длины определяется как

$$\alpha = A \cdot p \cdot e^{-Bp/E}, \quad (1.2)$$

где  $A \cdot p = 1/\lambda$ ;  $A$  – постоянная, зависящая от вида газа и от величины температуры, принятой неизменной;  $E$  – напряженность электрического поля;  $p$  – давление;  $B = A \cdot U_{и}$  ( $U_{и}$  – потенциал ионизации).

Обычно зависимость (1.2) записывается как

$$\frac{\alpha}{p} = A \cdot e^{-\frac{B}{E/p}} \text{ или } \frac{\alpha}{p} = f(E/p). \quad (1.3)$$

Графически зависимость (1.3) для воздуха представлена на рис. 1.1 и свидетельствует о том, что при неизменном отношении  $E/p$  коэффициент ударной ионизации электронами  $\alpha$  прямо пропорционален давлению газа.

**2.  $\beta$**  – коэффициент ударной ионизации положительными ионами, т. е. число свободных электронов, образуемых одним положительным ионом при столкновении с нейтральными частицами газа на 1 см пути от анода к катоду.

**3.  $\gamma$**  – коэффициент поверхностной ионизации, т. е. число электронов, вылетевших с 1 см<sup>2</sup> поверхности катода в результате бомбардировки ее положительными ионами.

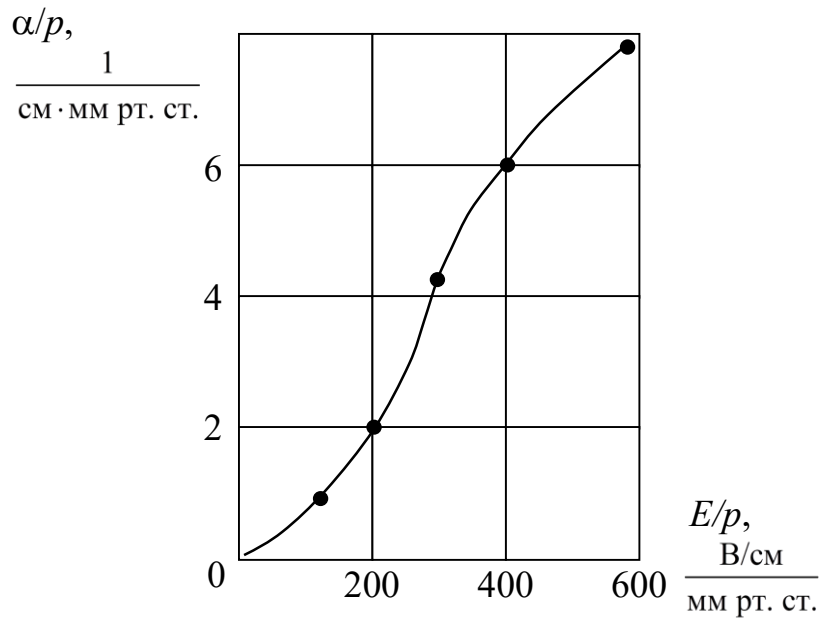


Рис. 1.1. Зависимость  $\alpha / p = f(E / p)$  для воздуха

Электроны, образующиеся в результате ионизации газа, движутся к аноду в виде локального сгустка (существующего в виде своеобразного компактного облачка), именуемого **лавиной электронов**. По мере продвижения к аноду число электронов в лавине растет по экспоненциальному закону, достигая предельного значения. Для однородного поля количество электронов и плотность электронного тока у анода определяется выражениями:

$$\begin{aligned} n_a &= n_0 \cdot e^{\alpha \cdot S}, \\ j_a &= j_0 \cdot e^{\alpha \cdot S}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где  $S$  – расстояние между электродами;  $j_0$  – ток, вызываемый внешним ионизатором;  $n_0$  – число электронов в межэлектродном промежутке, появившихся вследствие действия внешнего ионизатора.

После прекращения действия внешнего ионизатора могут иметь место следующие 2 случая:

1. Объемная ( $\beta$ ) и поверхностная ( $\gamma$ ) ионизации положительными ионами недостаточны для поддержания разряда. Число электронов в последующей лавине меньше, чем в предыдущей. Разрядный ток уменьшается и разряд прекращается.

2. Число электронов в каждой последующей лавине равно числу электронов в предыдущей лавине. Ток постоянный, разряд продолжается.

Для выполнения случая 2 необходимо обеспечить условие, которое можно записать выражением

$$\gamma(e^{e \cdot S} - 1) \geq 1. \quad (1.5)$$

Это соотношение получило название условия самостоятельности разряда. Следовательно, в случае самостоятельного разряда начальный электрон, появившийся у поверхности катода, должен обусловить настолько интенсивную ударную ионизацию, чтобы образовавшийся в результате ее

положительные ионы вырывают бы с катода также один электрон, который смог бы начать следующий процесс ионизации. При условии  $\gamma(e^{e \cdot S} - 1) < 1$  разряд будет *затухающим несамостоятельным*. При условии  $\gamma(e^{e \cdot S} - 1) = 1$  – *стационарным самостоятельным*. При условии  $\gamma(e^{e \cdot S} - 1) > 1$  разряд будет *усиливающимся*.

Из условия самостоятельности разряда можно определить пробивное напряжение  $U_{пр}$  газового промежутка. Деление соотношения (1.5) на коэффициент  $\gamma$ , перенесение единицы в правую часть и логарифмирование позволяет записать:

$$\alpha \cdot S = \ln(1 + 1/\gamma). \quad (1.6)$$

Решая совместно выражение (1.6) и уравнение (1.1), получим:

$$A \cdot p \cdot S \cdot e^{B \cdot p/E} = \ln(1 + 1/\gamma). \quad (1.7)$$

Подставив в выражение (1.7) отношение для пробивной напряженности  $E_{пр} = \frac{U_{пр}}{S}$  и произведя логарифмирование, получим

$$\frac{B \cdot p \cdot S}{U_{пр}} = \ln \left( \frac{A \cdot p \cdot S}{\ln(1 + 1/\gamma)} \right). \quad (1.8)$$

Отсюда

$$U_{пр} = \frac{B \cdot p \cdot S}{\ln \left[ \frac{A \cdot p \cdot S}{\ln(1 + 1/\gamma)} \right]}. \quad (1.9)$$

Из (1.9) следует, что разрядное напряжение в однородном поле является функцией произведения давления газа  $P$  и расстояния между электродами  $S$ :

$$U_{пр} = f(p \cdot S). \quad (1.10)$$

Это означает, что при неизменной температуре, при условии равенства произведения  $pS$  при различных значениях  $P$  и  $S$  пробивные напряжения будут иметь одинаковые значения. Такую закономерность экспериментально установил французский ученый Ф. Пашен еще до создания теории газового разряда Дж. Таунсендом. Функциональная зависимость (1.10) является законом Пашена, который, как следствие, вытекает из теории Таунсенда. Закон Пашена представлен графически на рис. 1.2. График носит название кривой Пашена, которая состоит из двух частей, или ветвей, с ярко выраженным минимумом.

$U_{пр}, \text{кВ макс}$

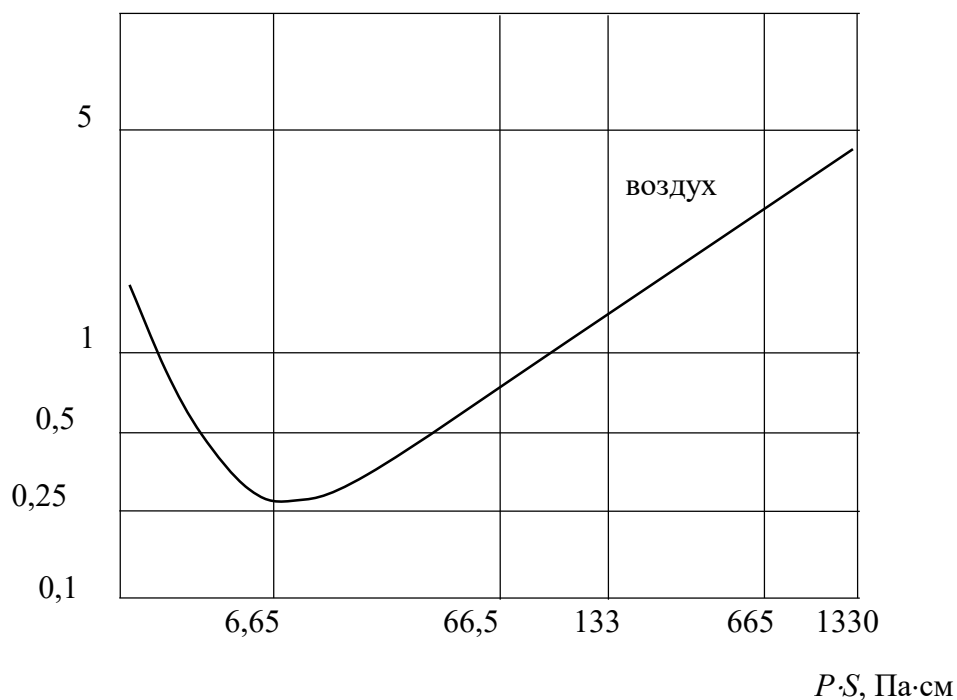


Рис. 1.2. Зависимость разрядного напряжения газовой среды от произведения  $p \cdot S$

Характерной особенностью кривой на графике является наличие ярко выраженного минимума пробивного напряжения. Наличие правой и левой ветвей в кривых Пашена можно качественно объяснить следующим образом.

При постоянном межэлектродном расстоянии ( $S = \text{const}$ ) повышение разрядного напряжения вправо от  $U_{\min}$  объясняется тем, что с увеличением давления  $P$  уменьшается длина свободного пробега электронов  $\lambda$ . Вследствие этого уменьшается кинетическая энергия, необходимая для акта ионизации. Чтобы увеличить кинетическую энергию до необходимого уровня, надо увеличить напряженность поля  $E$ , то есть поднять напряжение  $U$ . Увеличение разрядного напряжения  $U_{пр}$  влево от  $U_{\min}$  при уменьшении давления связано с тем, что уменьшается число столкновений электронов с молекулами вследствие уменьшения концентрации молекул. Для увеличения числа столкновений, которые завершатся ионизацией, то есть увеличения вероятности ионизации, необходимо увеличить напряжение ( $U$ ).

Если давление неизменно ( $P = \text{const}$ ), то повышение  $U_{пр}$  вправо от минимума можно объяснить тем, что при увеличении  $S$  уменьшается напряженность поля  $E$ . Это приводит к уменьшению вероятности ионизации. Чтобы поддержать ионизационные процессы на должном уровне, необходимо увеличить напряжение.

Повышение напряжения на левой части кривой при уменьшении  $S$  объясняется тем, что в этом случае длина межэлектродного промежутка становится соизмеримой с длиной свободного пробега электрона и меньше её, что уменьшает вероятность ионизации и кинетическую энергию, необходимую для ионизации.

Приведенная выше функциональная зависимость пробивного напряжения газового промежутка от давления и межэлектродного расстояния рассматривалась при неизменной температуре ( $T = \text{const}$ ). Реально же изменение температуры вызывает изменение давления, следовательно, это явление необходимо учитывать.

Для оценки влияния температуры введем в уравнение (1.10):

$$\frac{1}{\lambda} = A \cdot T_0 \cdot \frac{P}{T} \quad \text{и} \quad B_1 = B \frac{T_0}{T}, \quad (1.11)$$

где  $T_0 = 293 \text{ °K}$  ( $20 \text{ °C}$ ).

Тогда

$$U_{\text{пр}} = \frac{B \cdot T_0 \cdot \left( \frac{p \cdot S}{T} \right)}{\ln \left[ \frac{A \cdot T_0 \cdot \left( \frac{p \cdot S}{T} \right)}{\ln(1 + \frac{1}{\gamma})} \right]}. \quad (1.12)$$

Или в общем виде:

$$U_{\text{пр}} = f\left(\frac{p \cdot S}{T}\right) = f(\delta \cdot S), \quad (1.13)$$

где  $\delta = 0,386 \cdot \frac{p}{T}$ .

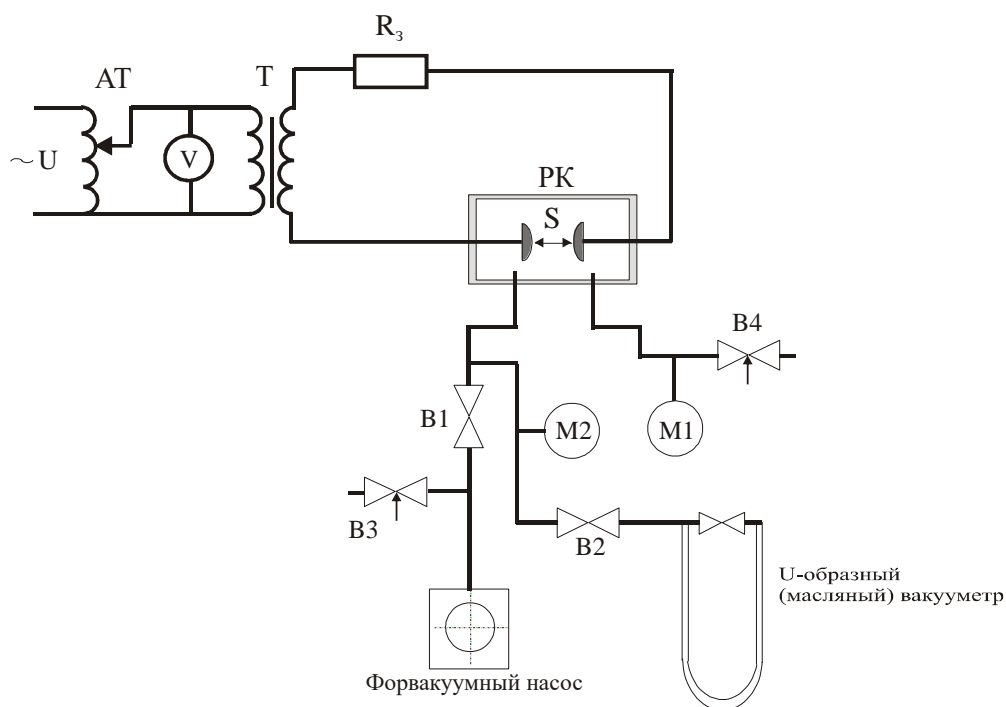
**Закон Пашена гласит: в однородном электрическом поле пробивное напряжение является функцией произведения расстояния между электродами и относительной плотности газа.**

## 1.2. Экспериментальная часть

**Цель:** получение зависимости пробивного напряжения газа от расстояния между электродами в разрядной камере с различным давлением путем экспериментальных измерений.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой (рис. 1.3) и правилами ТБ при выполнении работы.



*Рис. 1.3. Схема экспериментальной установки:*  
 *$R_3$  – защитное сопротивление;  $PK$  – разрядная камера;*  
 *$M1$  – манометрический преобразователь механического типа (ЭКВ-IV);*  
 *$M2$  – термодатный манометрический преобразователь (ВТ-2А);*  
 *$B1, B2, B3, B4$  – вентили*

В качестве источника высокого переменного напряжения используется трансформатор НОМ-10. Для изменения давления в разрядной камере используется форвакуумный насос типа ВН-461М. Для измерения давления в разрядной камере используются 2 вакуумметра – механический типа ЭКВ-IV ( $M1$ ) и термодатный ВТ-2А ( $M2$ ). Термодатный вакуумметр ВТ-2А предназначен для измерения малых давлений воздуха и состоит из термодатной манометрической лампы и измерительного блока, включающего схему для питания нагревателя термодатной лампы и стрелочный прибор, измеряющий ЭДС термодатной лампы и ток нагревателя. Шкала стрелочного прибора отградуирована в милливольтгах. Используя градуировочную кривую термодатной лампы (рис. 4), определяют значение давления в мм рт. ст.

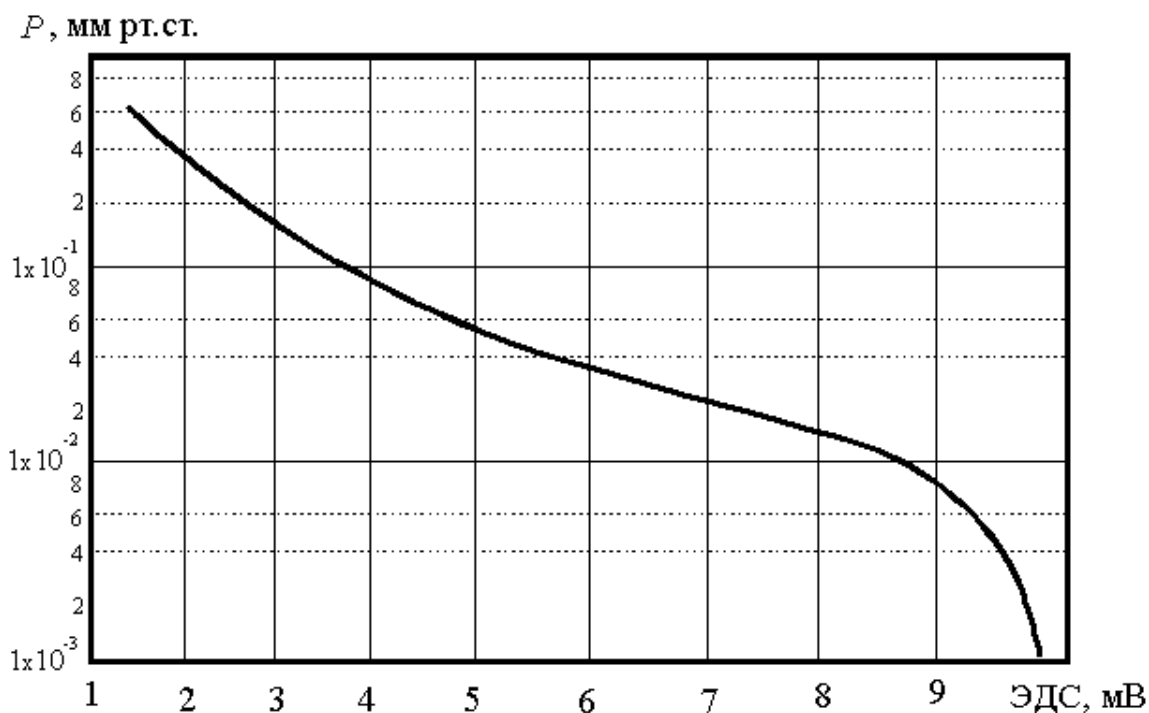


Рис. 1.4. Градуировочная кривая вакуумметра в диапазоне  $p = 2 \cdot 10^{-1} \dots 2 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.

Принцип действия прибора основан на изменении ЭДС термопары в зависимости от температуры нагревателя. При постоянном токе нагревателя ЭДС термопары будет определяться давлением окружающего газа. При понижении давления теплопроводность газа уменьшается, температура нагревателя при этом увеличивается и, как результат, увеличивается и ЭДС термопары. При измерении давлений в диапазоне  $p = 2 \cdot 10^{-1} \dots 2 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. ток нагревателя термопары регулируется в пределах 95...150 мА. Ток устанавливается при положении переключателя «Ток накала» рукояткой «Регулировка тока накала». При измерении ЭДС термопары переключатель устанавливается в положение «Измерение».

Для определения давления в мм рт. ст. по показаниям механического вакуумметра используется формула:

$$P = 760 \cdot (1 - P'), \text{ мм рт. ст.}, \quad (1.14)$$

где  $P'$  – показания механического вакуумметра.

Принцип действия U-образного масляного вакуумметра основан на уравнивании измеряемого давления (или разницы давлений, как в нашем случае) давлением столба жидкости. Об измеряемом давлении судят по высоте уравнивающего столба жидкости.

Для определения давления в мм рт. ст. по показаниям U-образного масляного вакуумметра используется формула

$$P = P_1 + \rho_m \cdot g \cdot \Delta h \cdot 0,75 \cdot 10^{-2}, \text{ мм рт. ст.},$$

где  $P_1$  – значение давления относительно которого ведется расчет;  $\rho_m = 860 \text{ кг/м}^3$  – плотность масла в вакуумметре;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ;  $\Delta h$  – разница столбов масла вакуумметра, м.





Механический вакуумметр ( $P$ , дел.)				

2.7. Определить разрядные напряжения при одном давлении для различных значений межэлектродных промежутков. Данные занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

*Значения пробивных напряжений при постоянном давлении*

	Расстояние $S$ , см	$P \cdot S$ , мм рт. ст.·см	$U_{пр}$ , кВ
$P = \text{const} =$ мм рт. ст.			

2.8. Выключение установки производится следующим образом: Вентили В1, В2, В3, В4 выводятся в положение «Закрыто».

Приоткрывая вентиль В3, в момент начала поступления воздуха в систему, производим отключение форвакуумного насоса.

### Задания по результатам исследования

1. По данным пункта 2.2 построить зависимости напряжения пробоя газа  $U_{пр}$  от произведения давления на межэлектродное расстояние и пояснить их.
2. По данным пункта 2.3 построить зависимости напряжения пробоя газа  $U_{пр}$  от произведения давления на межэлектродное расстояние и пояснить их.
3. Описать основные электрофизические процессы, протекающие на левой ветви кривой Пашена.
4. Описать электрофизические процессы, имеющие место на правой ветви кривой Пашена.
5. Привести выражение закона Пашена с учетом температуры окружающего воздуха и пояснить его физический смысл.

### Контрольные вопросы

1. В каких областях современной индустрии применяется закон Пашена?
2. Что означает для газовой изоляции нахождение в точке минимума на кривой Пашена?
3. Какие пути увеличения электрической прочности газовой изоляции можно использовать в эксплуатации на основе кривой Пашена?
4. Что означает на практике «двигаться вверх по левой ветви кривой Пашена»?
5. Что означает на практике «двигаться вверх по правой ветви кривой Пашена»?

Отчет по экспериментальной части выполняется на листах белой бумаги формата А4 в строгом соответствии с СТО ТПУ.

Отчет должен также содержать развернутые ответы на контрольные вопросы. На защите отчета необходимо быть готовыми строить ответы на основе как изученного теоретического материала, так и результатов, полученных лично подгруппой в ходе выполнения экспериментальных исследований.

### **Список литературы**

1. Базелян Э.М. Искровой разряд в воздухе / Э.М. Базелян, И.М. Ражанский. – Новосибирск : Наука, 1988. – 164 с.
2. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / И.М. Бортник, И.П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин и др. ; под ред. И.М. Верещагина. – Москва : Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – Москва : Наука, 1987. – 592 с.
4. Голант В.Е. Основы физики плазмы / В.Е. Голант, А.П. Жилинский, И.Е. Сахаров. – Москва : Атомиздат, 1977. – 384 с.