

# ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВЫХ ПАШЕНА

**Цель работы:** получение и исследование зависимостей напряжения пробоя от давления (кривых Пашена) для аргона и воздуха.

## 1. Введение

Закон Пашена – экспериментально наблюдаемая закономерность зависимости напряжения пробоя от расстояния между электродами или давления газа [1-3]. Кривые Пашена являются важнейшей характеристикой газового разряда. В настоящее время существует множество экспериментальных данных по определению кривых Пашена для различных газов [4-9]. Однако результаты этих экспериментов сильно зависят от различных условий, в частности, от состава газа, материала электродов и др. Поэтому кривые, приведенные в литературе, заметно различаются. Вопрос о влиянии различных условий на кривые Пашена является важным, поэтому экспериментальные данные в этой области представляют интерес.

## 2. Теоретическая часть

Первая количественная теория газового разряда была предложена Таунсендом в начале XX века. Она называется теорией электронных лавин. Эта теория применима к тем типам электрических разрядов в газах или к тем областям газового разряда, где направленное движение электронов под действием электрического поля преобладает над их беспорядочным движением. Механизм разряда теория электронных лавин описывает следующим образом. Для осуществления разряда необходимо образование свободных электронов под действием внешнего ионизатора. Образование этого свободного электрона может происходить как в объеме газа, так и на поверхности катода. Для определенности предположим, что электроны под действием внешнего ионизатора выделяются с поверхности катода. Пусть под действием внешнего ионизатора с  $1 \text{ см}^2$  поверхности катода за 1 сек. выделяется  $n_0$  электронов. Если предположить, что отсутствуют причины, вызывающие потери заряженных частиц, то в цепи будет идти только лишь начальный ток плотности  $j_0 = en_0$ , где  $e$  – элементарный заряд. При большом напряжении на электродах первичные электроны, движущиеся к аноду, ускоряются настолько, что на пути ионизируют атомы газа. При этом появляются новые свободные электроны и положительные ионы. Эти

электроны тоже двигаются к аноду и тоже ионизируют атомы газа. Таким образом, число электронов, двигающихся к аноду, постепенно увеличивается по мере удаления от катода. Явление сильного увеличения числа электронов, двигающихся к аноду, носит название лавины электронов [2-5].

Для описания процесса ионизации Таунсенд ввел три коэффициента.

Первый из них является коэффициентом объемной ионизации газа электронами и обозначается через  $\alpha$ . Коэффициент  $\alpha$  показывает число свободных электронов и равное ему число положительных ионов, производимых одним электроном путем соударений с атомами газа при движении этого электрона на 1 см в направлении от катода к аноду. Выражение для  $\alpha$  выводится при следующих допущениях:

а) электрон ионизует только тогда, когда его кинетическая энергия  $W_k$  равна или превышает энергию ионизации  $W_u$  ( $\frac{m \cdot V^2}{2} \geq W_u$ );

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 двигается вдоль силовых линий электрического поля.

Число ионизирующих столкновений на единице длины определяется как

$$\alpha = A \cdot p \cdot e^{-Bp/E}, \quad (1)$$

где  $A \cdot p = 1/\lambda$ ,

$A$  – постоянная, зависящая от вида газа и от величины температуры, принятой неизменной;

$E$  – напряженность электрического поля;

$p$  – давление;

$B=A \cdot U_u$  ( $U_u$  – потенциал ионизации).

Обычно зависимость (1) записывается как

$$\frac{\alpha}{p} = A \cdot e^{-\frac{B}{E/p}} \quad \text{или} \quad \frac{\alpha}{p} = f(E/p), \quad (2)$$

Второй коэффициент  $\beta$  характеризует объемную ионизацию, производимую положительными ионами, и определяется аналогично коэффициенту  $\alpha$ .

Третий коэффициент  $\gamma$  характеризует поверхностную ионизацию на катоде. Коэффициент  $\gamma$  показывает сколько в среднем электронов выделяется из катода на каждый положительный ион, попадающий на катод.

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 [5].

Выведем закон нарастания числа электронов в лавине. Рассмотрим плоскую параллельную систему электродов, и ось  $x$  направим перпендикулярно к поверхности электродов. Рассмотрим ионизацию, производимую электронами в слое газа толщиной  $dx$ , расположенном на расстоянии  $x$  от катода (рис. 1).

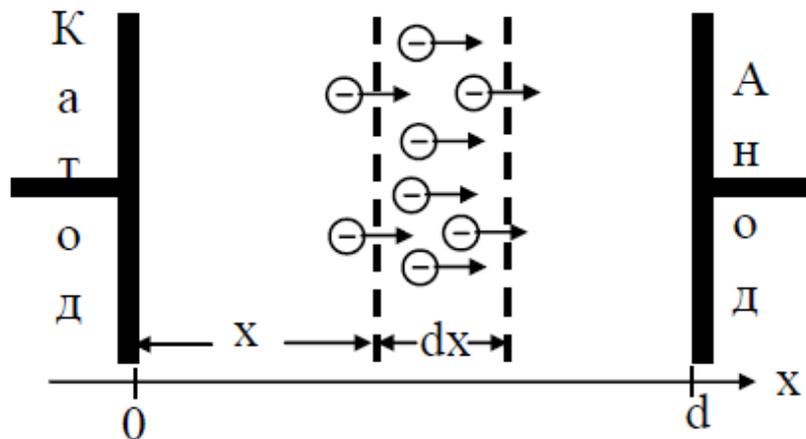


Рисунок 1 – К выводу закона нарастания лавины электронов

Пусть в этот слой через  $1 \text{ см}^2$  поверхности со стороны катода в единицу времени влетает  $n$  электронов. Так как каждый из электронов на пути в  $1 \text{ см}$  производит  $\alpha$  ионизаций, то на пути  $dx$  каждый электрон произведет  $\alpha dx$  электронов, а все  $n$  влетевших в слой электронов производят  $n\alpha dx$  ионизаций. Так как в каждом акте ионизации появляется один положительный ион и один свободный электрон, то на пути  $dx$  число электронов лавины  $n$  увеличивается на величину

$$dn = n\alpha dx$$

Из данного выражения получим:  $n = n_0 \cdot e^{\alpha \cdot d}$

Для однородного поля плотность электронного тока у анода соответственно можно записать выражениями:

$$j_a = j_0 \cdot e^{\alpha d}, (3)$$

где  $d$  – 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

$$\gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1) \geq 1, (4)$$

Это соотношение получило название условия самостоятельности разряда. Следовательно, в случае самостоятельного разряда начальный электрон, появившийся у поверхности катода, должен обеспечить настолько интенсивную ударную ионизацию, чтобы образовавшиеся в результате положительные ионы вырывали бы с катода также один электрон, который смог бы начать следующий процесс ионизации. При условии  $\gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1) < 1$  разряд будет затухающим несамостоятельным. При условии  $\gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1$  является стационарным самостоятельным. При условии  $\gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1) > 1$  разряд будет усиливающимся.

Из условия самостоятельности разряда можно определить пробивное напряжение  $U_{пр}$  газового промежутка. Деление соотношения (4) на  $\gamma$ , перенесение единицы в правую часть и логарифмирование дает выражение

$$\alpha \cdot d = \ln(1 + \frac{1}{\gamma}), (5)$$

Решая совместно выражение (5) и уравнение (2), получим:

$$A \cdot p \cdot d \cdot e^{\frac{B \cdot p}{E}} = \ln(1 + \frac{1}{\gamma}), (6)$$

Подставив в выражение (6)  $E_{np} = \frac{U_{np}}{d}$  и произведя логарифмирование, получим:

$$\frac{B \cdot p \cdot d}{U_{np}} = \ln \left( \frac{A \cdot p \cdot d}{\ln(1 + 1/\gamma)} \right), \quad (7)$$

Отсюда

$$U_{np} = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln \left[ \frac{A \cdot p \cdot d}{\ln(1 + 1/\gamma)} \right]}, \quad (8)$$

Из (8) следует, что разрядное напряжение в однородном поле является функцией произведения давления газа  $P$  на расстояние между электродами  $d$ .

$$U_{np} = f(p \cdot d), \quad (9)$$

Это означает, что при неизменной температуре, при условии равенства произведения  $p \cdot d$ , при различных значениях  $P$  и  $d$  пробивные напряжения будут иметь одинаковые значения. Такую закономерность экспериментально установил немецкий ученый Пашен еще до создания теории газового разряда Таунсендом. Функциональная зависимость (9) является законом Пашена, который, как следствие, вытекает из теории Таунсенда. Закон Пашена может быть представлен графически (рис. 2).

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

При постоянном межэлектродном расстоянии ( $d = \text{const}$ ) 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  $U_{np}$  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

завершаться ионизацией, то есть увеличения вероятности ионизации, необходимо увеличить напряжение ( $U$ ).

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

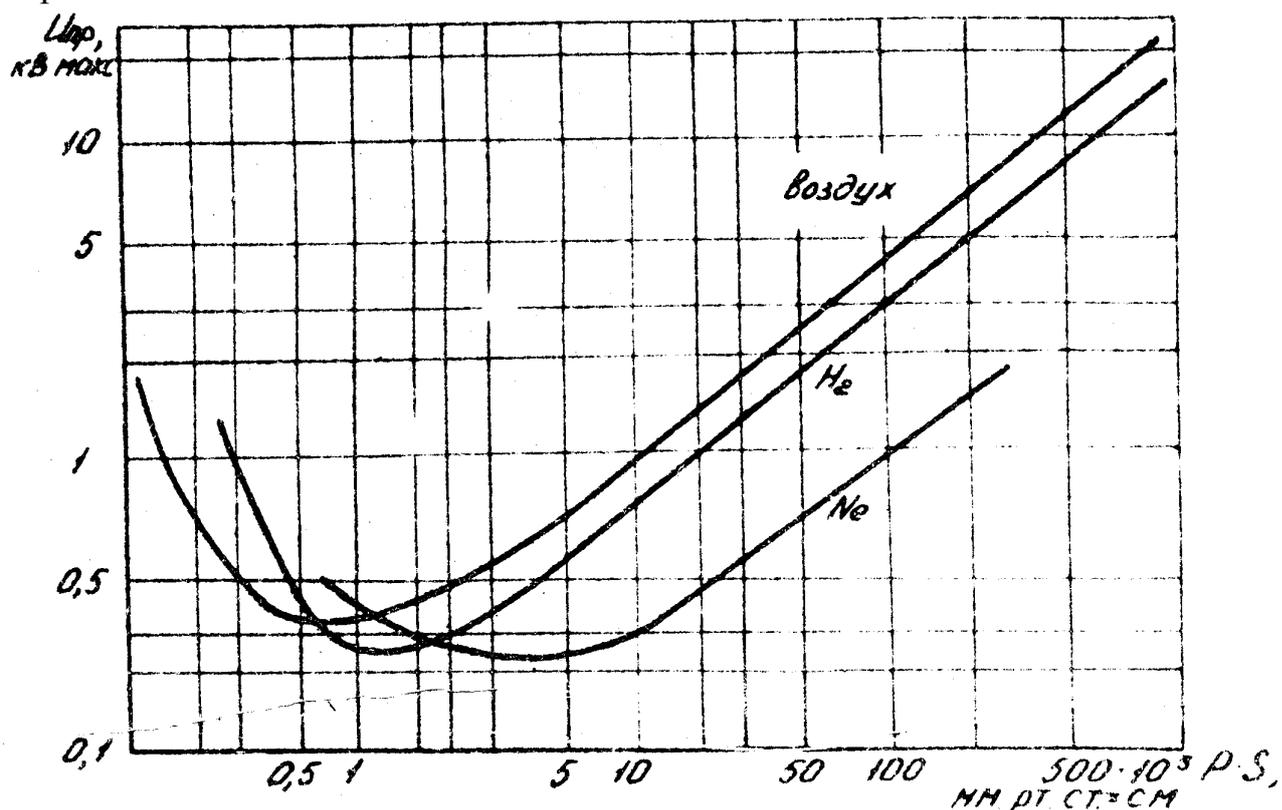


Рисунок 2 – Зависимость разрядного напряжения некоторых газов от произведения  $p \cdot d$  [2]

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

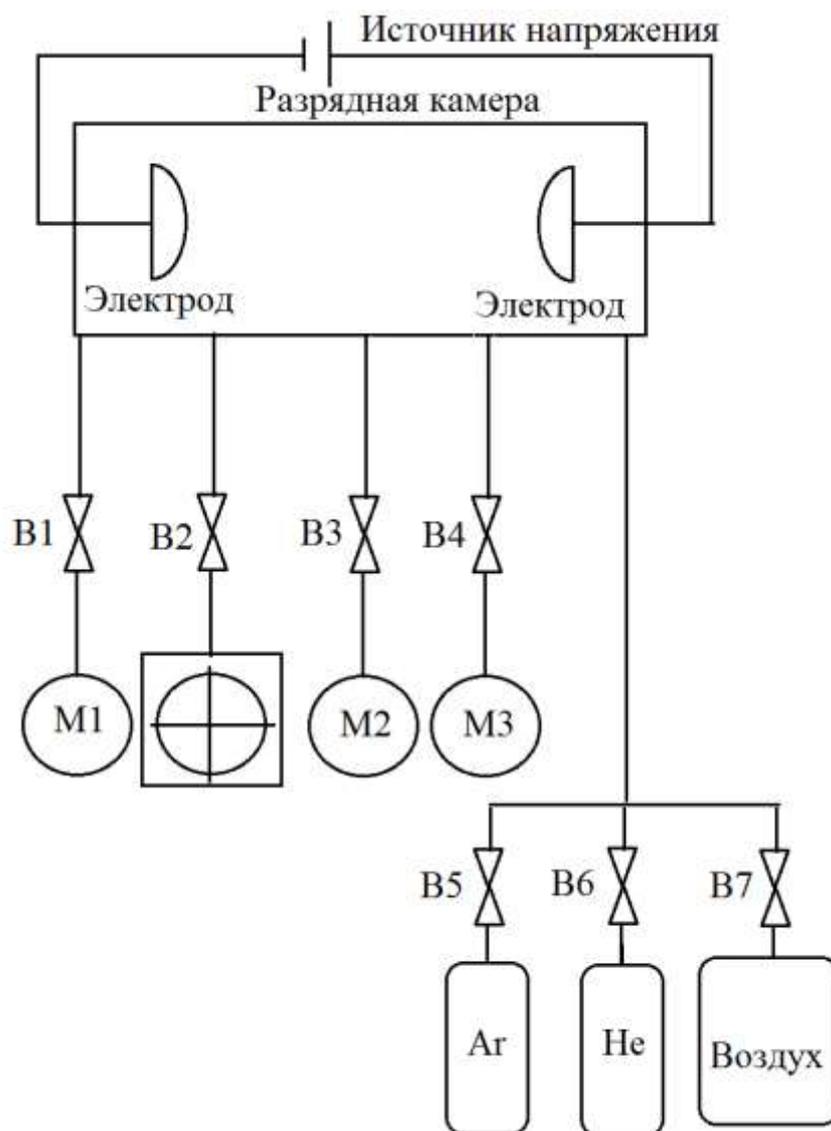
Приведенная выше функциональная зависимость пробивного напряжения газового промежутка от давления и межэлектродного расстояния рассматривалась при неизменной температуре ( $T=\text{const}$ ). Реально же изменение температуры вызывает изменение давления, следовательно, это явление необходимо учитывать.

## 2. Экспериментальная часть

Общий вид установки показан на рисунке 3. На лицевой стороне шкафа размещены манометры измерения полного давления, панель управления и регистрации, окно для наблюдения разряда в вакуумной камере. Внутри установки размещены разрядная камера, вакуумная система откачки камеры, включающая насос, клапаны и трубопровод, система напуска газа, источник высоковольтного испытательного напряжения, вакуумный датчик и электронный измеритель давления.



Рисунок 3 – Общий вид установки изучения кривых Пашена  
Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 4.



M1 – электронный манометр, M2 – механический манометр, M3 – U-образный жидкостной манометр; B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7 – вентили.

Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки

Для измерения давления в разрядной камере используется электронный манометр типа KVC450.

### 3. Задание к работе

3.1 Ознакомиться с экспериментальной установкой (рис. 3) и правилами ТБ при выполнении работы.

3.2 Определить разрядные напряжения при различных давлениях в разрядной камере с промежутком  $S=10$  см. Заполнить таблицу 1.

3.3 Построить кривые Пашена для воздуха и аргона.

Таблица 1

Воздух		
Давление	$P * S$ , мм.рт.ст.*см	$U_{пр}$ , кВ
Аргон		
Давление	$P * S$ , мм.рт.ст.*см	$U_{пр}$ , кВ

#### 4. Порядок выполнения лабораторной работы

4.1 Первоначальное положение всех вентилях (В1, В2, В3, В4, В5, В6, В7) – закрыто.

4.2 Перевести вентиль В1 в положение – открыто.

4.3 Кнопкой «Пуск» на передней панели установки запустить насос.

4.4 Открыть вентиль В2, откачать воздух из разрядной камеры до 0,1 Торра.

4.5 Открыть натекагель, откачать газовую магистраль до 0,1 Торра. Закрыть натекагель.

4.6 Открыть В7, напустить воздух в газовую магистраль. С помощью натекагеля напустить воздух в разрядную камеру до давления 10 торр.

4.7 Включить источник высокого напряжения с помощью тумблера «Сеть» источника высокого напряжения. С помощью ручки регулятора источника напряжения подать на электроды в разрядной камере напряжение 2,5 кВ.

4.8 Постепенно уменьшать давление в камере путем плавного закрытия натекагеля до тех пор, пока не загорится разряд в разрядной камере. Произвести измерение давления с помощью электронного вакуумметра. Результаты измерений давления воздуха и соответствующие ему значения  $U_{пр}$  занести в табл. 1. Выключить источник высокого напряжения с помощью кнопки «Сеть», расположенной на панели источника.

4.9 С помощью натекаателя напустить воздух в разрядную камеру до давления 10 торр.

4.10 Действия описание в пункте 4.7-4.9 повторить для значений напряжений 2,4-0,9 кВ с шагом 0,1 кВ.

4.11 Закрывать натекаатель. Закрывать вентиль В7.

4.12 Открыть натекаатель, откачать газовую магистраль до 0,1 Торра. Закрывать натекаатель.

4.13 Открыть В5, напустить аргон в газовую магистраль. С помощью натекаателя напустить аргон в разрядную камеру до давления 15 торр.

4.14 Включить источник высокого напряжения с помощью тумблера «Сеть» источника высокого напряжения. С помощью ручки регулятора источника напряжения подать на электроды в разрядной камере напряжение 2,5 кВ.

4.15 Постепенно уменьшать давление в камере путем плавного закрытия натекаателя до тех пор, пока не загорится разряд в разрядной камере. Произвести измерение давления с помощью электронного вакуумметра. Результаты измерений давления аргона и соответствующие ему значения  $U_{пр}$  занести в табл. 1. Выключить источник высокого напряжения с помощью кнопки «Сеть», расположенной на панели источника.

4.16 С помощью натекаателя напустить аргон в разрядную камеру до давления 15 торр.

4.17 Действия описание в пункте 4.14-4.16 повторить для значений напряжений 2,4-0,9 кВ с шагом 0,1 кВ.

4.18 Ручкой регулятора на источнике высокого напряжения установить минимальное значение 0,9 кВ. Тумблером «Сеть» на панели источника напряжения выключить его.

4.19 Закрывать вентиль В5. Откачать аргон из разрядной камеры. Закрывать натекаатель, а затем закрыть вентиль В2.

4.20 Вентиль В1 переключаем в положение – «Закрывается».

4.21 Кнопкой «Пуск» на передней панели установки выключаем форвакуумный насос.

## **5. Содержание отчета**

5.1 По данным табл.1 построить зависимости разрядного напряжения  $U_{пр}$  от произведения давления на межэлектродное расстояние и пояснить их.

5.2 Привести выражение закона Пашена с учетом температуры окружающего воздуха и пояснить его физический смысл.

5.3 Обсуждение результатов и сопоставление с теорией.

## **6. Вопросы для самоконтроля**

6.1 Поясните сущность процессов ударной ионизации, рекомбинации и вторичной электронной эмиссии.

6.2 Поясните физический смысл математического выражения условия самостоятельности разряда.

6.3 Назовите области применения кривых Пашена.

6.4 Что такое лавина электронов?

6.5 Физический смысл коэффициентов Таунсенда.

6.6 Объясните наличие правой и левой ветвей в кривых Пашена.

6.7 От чего зависит величина напряжения зажигания разряда при изучении кривых Пашена?

## **Список литературы**

1. Капцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. – М.-Л.: Гостехиздат, 1950. – 836 с.

2. Райзнер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992. – 535 с.

3. Физический энциклопедический словарь // Гл. ред. А. Н. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 928 с.

4. Ражанский И.М. Физические процессы при разряде в воздушном промежутке. – Новосибирск. – 1985. – 71 с.

5. Куртенков Г.Е. Разрядные процессы в газах. – Томск: издательство ТПУ. – 1993. – 71 с.

6. Техника испытаний высоким напряжением. Ч.2 Методы испытаний./ Стандарт МЭК.- М.: Изд-во стандартов. 1979. – 56 с.

7. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа. – 1982. – 207 с.

8. Яновский В.П., Луканин А.А. Установка для изучения закона Пашена // Изв.ТПУ. – 2008. – Т.313. – N. 2. – P. 101–105.

9. Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда / Пер.И.И. Ивангина. – М.: Атомиздат. 1980. – 182 с.