

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Шемелина Анастасия Алексеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

«Измерение характеристик импульсного тлеющего разряда»

Практикум электричества и магнетизма, 2 курс, группа № 18301

Научный руководитель:

к. ф.-м. н., Ю. Г. Ермолаев

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 2019 г.

Преподаватель практикума

к. ф.-м. н., асс. Я. В. Гетманов

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 2019 г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019 г.

Содержание:

1. Аннотация	3
2. Введение	4
3. Теоретическая часть	4
3.1. Газовый разряд, общее описание	4
3.2. Глеющий разряд	6
3.3. Напряжение пробоя, закон Пашена	6
4. Используемое оборудование	8
4.1. Датчик давления Метран-55	10
4.1.1. Калибровка датчика давления	11
4.1.1.1. Весы рейтерного типа	11
4.1.1.2. Ртутный манометр	12
4.1.2. Результаты калибровки датчика давления	13
4.2. Описание установки	13
5. Результаты измерений	16
5.1. Эксперимент 1	16
5.2. Эксперимент 2	17
6. Заключение	18
7. Список литературы	19

1. Аннотация

Целью работы являлось измерение напряжения пробоя в зависимости от произведения давления на размер диэлектрического промежутка и последующее сравнение с известными данными. Для этой цели была собрана установка, состоящая из герметичной камеры, с помещенным внутри разрядником. Разряд горел с помощью импульсного источника зажигания. Также были записаны осциллограммы напряжения пробоя, при различных давлениях в камере. На основании полученных данных были построены кривые зависимости напряжения пробоя от произведения давления на размер диэлектрического промежутка (кривые Пашена). Также была проведена калибровка датчика давления для перевода электрического сигнала в единицы измерения давления.

2. Введение.

Для экспериментального изучения устойчивости пограничного слоя существует два подхода. В первую очередь это эволюция естественных возмущений в пограничном слое. С данным подходом, из-за случайной природы зарождения естественных возмущений, невозможно определить волновые характеристики пульсаций и количественно сравнить их с теорией. Другим подходом является эксперимент в контролируемых условиях, когда в поток вводятся возмущения с известными начальными характеристиками, что позволяет определить волновые характеристики вводимых в пограничный слой возмущений, и напрямую сопоставить полученные результаты с теоретическими расчетами. В Аэрофизическом эксперименте используются различные методы введения контролируемых возмущений в поток, и периодический тлеющий разряд является одним из них [1].

Измерение параметров тлеющего разряда является необходимой частью, при подготовке к экспериментам по изучению устойчивости пограничного слоя, поскольку от характеристик разряда и от его устойчивости зависит амплитуда возмущений.

3. Теоретическая часть.

3.1. Газовый разряд, общее описание.

Проведём мысленный эксперимент. Поместим в стеклянную трубку два электрода А и К, подключаемых к источнику постоянного напряжения. Трубку можно откачивать и наполнять разными газами при разных давлениях. (рис. 1.) Если подать на электроды небольшое напряжение, например, 10 вольт, то наличие слабого тока зарегистрирует только сверхчувствительный прибор. Такой ток, порядка 10^{-15} А, может образоваться под действием космического излучения и естественной радиоактивности. Для возникновения разряда необходимо наличие

внешнего источника образования заряженных частиц в промежутке между катодом и анодом. Разряд и электрический ток, которые возникают только благодаря действию постороннего ионизирующего агента или в результате эмиссии электронов или ионов с электродов под действием посторонних причин (например, вследствие накаливания катода), называют **несамостоятельными** [2]. Далее при увеличении напряжения несамостоятельный ток растет, поле вытягивает все образующиеся заряды, до того, как они прорекомбинируют, после завершения данного процесса ток перестает расти и достигает насыщения. При дальнейшем увеличении напряжения, при некотором его значении ток резко возрастает и появляется свечение. Так происходит один из важнейших разрядных процессов – **пробой**. При давлении $p \sim 1 \text{ Тор} \equiv 1 \text{ мм. рт. ст.}$ и межэлектродном расстоянии $L \sim 1 \text{ см}$ напряжения пробоя составляют несколько сотен вольт [2]. Тогда разряд приобретает **самостоятельный** характер. Ускоряясь в поле электрон набирает энергию, которую, достигнув потенциала ионизации атомов, затрачивает на вырывание другого электрона. Таким образом, появляются два медленных электрона. При повторении данного процесса развивается **электронная лавина** и происходит **размножение электронов**.

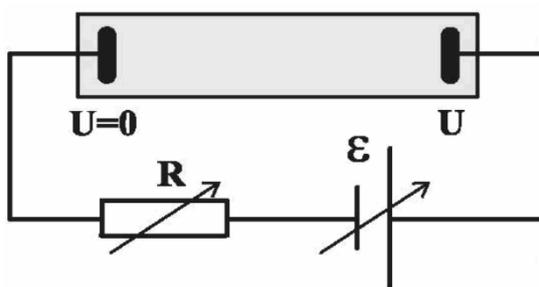


Рис. 1. Электрическая схема разряда в газовой трубке, взято из [2]

Далее, все зависит от ряда условий. При небольших давлениях (например, 1 – 10 Тор) и большом электрическом сопротивлении внешней цепи, которое не позволяет течь большому току, в результате пробоя

зажигается **тлеющий разряд** – один из наиболее распространенных и важных типов разряда [2].

3.2. Тлеющий разряд.

Тлеющий разряд – это самоподдерживающийся разряд с холодным катодом, испускающим электроны в результате вторичной эмиссии, главным образом под действием положительных ионов [2]. Отличительный признак данного типа разряда – **катодный слой**. Катодный слой характеризуется большим положительным объёмным зарядом, сильным полем у поверхности и значительным падением потенциала: 100 – 400 В (и более) – **катодным падением**, толщина слоя обратно пропорциональна плотности (давлению) газа. При достаточно большом межэлектродном расстоянии, между катодным слоем и анодом образуется электронейтральная плазменная область. Серединную её часть называют положительным столбом. От анода он отделяется анодным слоем.

Для тлеющего разряда в трубках радиуса $R = 1$ см, длины $L = 10 - 100$ см при типичных давлениях $p \sim 10^{-2} - 10^2$ Тор характерны напряжения на электродах $V \sim 10^2 - 10^3$ В и токи $I \sim 10^{-4} - 10^{-1}$ А [2].

3.3. Напряжение пробоя, закон Пашена.

В 1889 году Пашен обнаружил, что напряжение пробоя является функцией произведения плотности газа и межэлектродного расстояния в однородном электрическом поле.

Согласно [3], закон Пашена является следствием таунсендовской теории и может быть получен из критерия пробоя по Таунсенду:

$$\mu = \gamma(\exp(\alpha d) - 1) = 1 \quad (1)$$

где γ – эффективный коэффициент вторичной эмиссии с катода, d – размер межэлектродного промежутка, α – первый коэффициент Таунсенда. Используя для обозначения плотности газа p и с учетом $\frac{\alpha}{p} = A_p \exp\left(-\frac{B_p p}{E}\right)$, прологарифмируем выражение (1) и получим:

$$A_p p \exp\left(-\frac{B_p p}{E}\right) = \frac{1}{\alpha} \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$$

Логарифмируя ещё раз, имеем

$$\frac{A_p p d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} = \exp\left(B_p \frac{p}{E}\right)$$

Откуда

$$B_p \frac{P \cdot d}{E_b \cdot d} = \ln \frac{A_p p d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}$$

В итоге напряжение пробоя будет

$$U_b \equiv E_b \cdot d = \frac{B_p p d}{\ln \frac{A_p p}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} = f(pd) \quad (2)$$

Пример кривых Пашена для различных газов приведен на рис. 2. При больших pd наблюдается подъём кривой, который объясняется уменьшением длины свободного пробега и снижением вероятности набора электроном необходимой для ионизации энергии. Подъём кривой слева – уменьшением числа столкновений на длине промежутка.

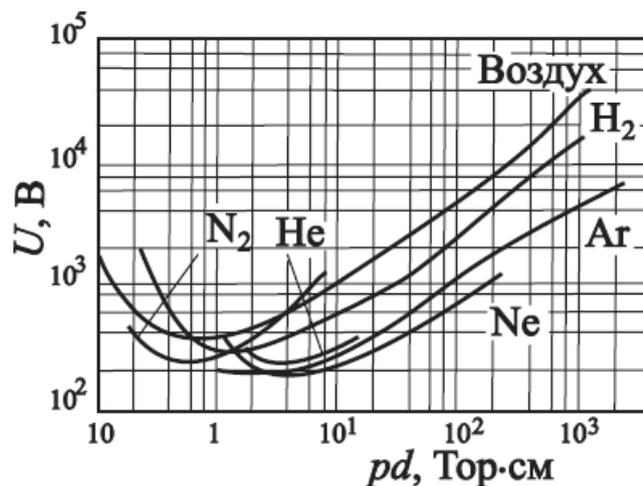


Рис.2. Зависимость напряжения пробоя для различных газов от произведения давления на диэлектрический промежуток, взято из [3].

4. Используемое оборудование.

В процессе проведения экспериментов измерялась зависимость напряжения пробоя от давления окружающей среды и расстояния диэлектрического промежутка для двух разрядников с различными межэлектродными расстояниями. Оба разрядника состояли из двух медных электродов, помещенных в керамическую оболочку (рис. 3). В первом эксперименте расстояние между электродами составило $d = 0,059 \pm 0,001$ см, во втором - $d = 0,115 \pm 0,001$ см. Также различались размеры электродов для первого и второго экспериментов. Средний диаметр электродов для первого разрядника составил $D = 0,067 \pm 0,001$ см, а для второго $D = 0,182 \pm 0,001$ см.

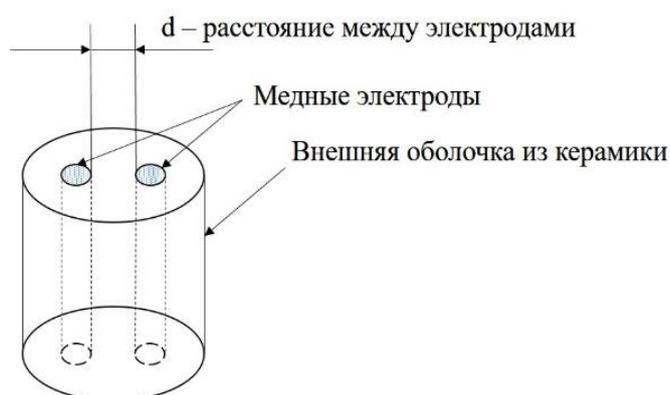


Рис.3. Внешний вид разрядника.

В каждом из опытов разрядник устанавливался в герметичную камеру, где менялось давление в диапазоне от нуля до атмосферного. Его измерение проводилось с помощью абсолютного датчика давления Метран-55.

Напряжение пробоя измерялось цифровым осциллографом АК ИП-4122/11V с максимальной частотой дискретизации 500 МГц.

Осциллограф подключался в схему через высоковольтный пробник Tektronix P6015A с максимально допустимым напряжением до 20 кВ постоянного тока и 40 кВ пикового тока (длительность сигнала 100 мс). Коэффициент деления в нашем эксперименте составлял 1000.

4.1. Тензорезистивный датчик давления Метран-55.

Для измерения давления в работе использовался датчик абсолютного давления Метран-55 с диапазоном измерений $0,1 \div 2,5$ атм.

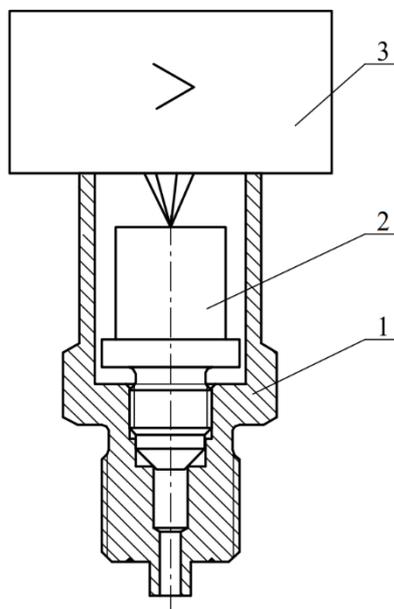


Рис.4. Схема датчика Метран-55, взято из [4]

Датчик состоит из корпуса 1, мембранного тензопреобразователя (ТП) 2 и электронного преобразователя 3. Измеряемое давление подводится в рабочую полость и воздействует непосредственно на измерительную мембрану тензопреобразователя 2, вызывая ее прогиб [4]. Измерительная мембрана тензопреобразователя состоит из металлической мембраны, на внешней поверхности которой жестко закреплен чувствительный элемент, состоящий из кремниевых пленочных тензорезисторов. Которые в свою очередь, соединены в мостовую схему. Деформация мостовой схемы приводит к изменению сопротивления тензорезистора и разбалансу схемы. Затем на электронный преобразователь подается электрический сигнал образующийся при разбалансе мостовой схемы, который потом преобразуется в стандартный токовый выходной сигнал. Данный способ измерения даёт большую точность показаний.

4.1.1. Калибровка датчика давления.

Схема калибровки датчика давления, представленная на рис. 6, состоит из герметичной камеры, к которой подключается датчик давления, вакуумный насос и рейтерные весы, в качестве эталонного измерителя давления. Напряжение с выхода датчика давления измерялось цифровым мультиметром MAS830

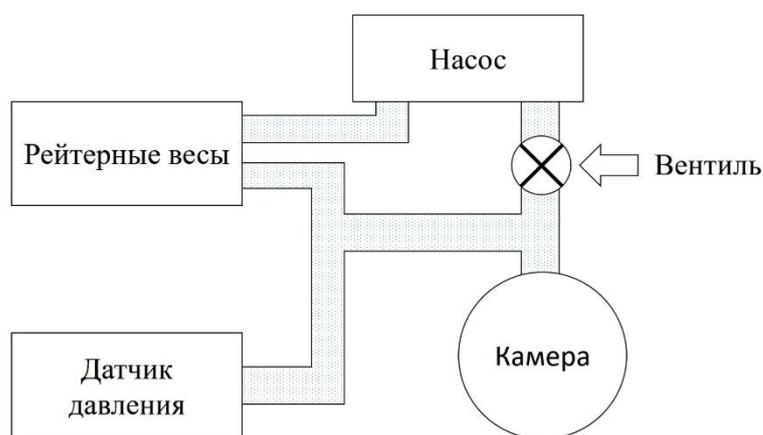


Рис. 6. Блок-схема калибровки датчика давления

4.1.1.1. Весы рейтерного типа.

Мы использовали рейтерные весы как эталонный измеритель, и по их показаниям определяли текущее давление в камере. Схематично рейтерные весы можно сравнить с обыкновенными. Под действием рычагов разница давлений передается на ось рейтера, на одну сторону оси подается опорное давление разряжения, которое создает вакуумный насос, на другую сторону оси - измеряемое давление. С другой стороны, груз передвигается вдоль оси рейтера и компенсирует давление. Когда положение груза находится в конце рейтера, происходит увеличение массы груза и, соответственно увеличение диапазона. Для определения положения груза рейтера (количества оборотов, при котором наступило равновесие) используется фото-импульсный преобразователь (ФИП). ФИП в основном состоит из диска закрепленного на оси рейтера, в котором просверлены 10 отверстий с равным шагом, и двух пар (светодиод + фотодиод). Светодиод и фотодиод

расположены напротив друг друга и при прохождении отверстия между ними появляется импульс. По количеству импульсов можно определить на сколько оборотов сдвинулся груз. Вторая пара светодиод-фотодиод нужна для определения направления вращения оси рейтера. Давление рассчитывается следующим образом:

$$P \text{ [кгс/м}^2\text{]} = 2,649 \cdot (N + 500 \cdot D)$$

где D - диапазон, N - число оборотов. Принципиальная схема представлена на рис.7.

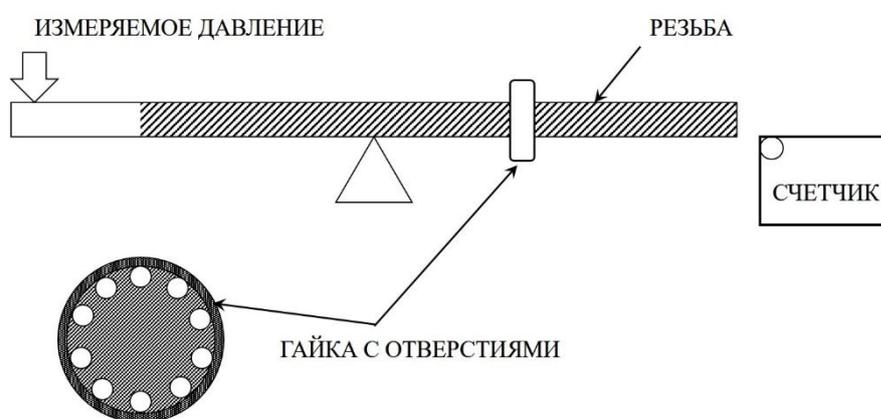


Рис. 7. Принципиальная схема весов рейтерного типа

4.1.1.2. Ртутный манометр

Проверка калибровочной зависимости проводилась для атмосферного давления с помощью ртутного манометра. Показания манометра пересчитывались в кгс/м^2 , измерялась температура и давление считалось по следующей формуле

$$P \text{ [кгс/м}^2\text{]} = (10,20499 - 0,00166 \cdot t \text{ [}^\circ\text{C]}) \cdot (P - 0,2)$$

Давление измеряемое рейтерными весами определялось согласно следующему выражению

$$P \text{ [кгс/м}^2\text{]} = K \cdot (N + 500 \cdot D)$$

(где $K = 2.649$ - калибровочный коэффициент, N - число оборотов вала, D - диапазон рейтерных весов)

4.1.2. Результаты калибровки датчика давления

В результате мы выяснили, что калибровочная зависимость, которая представлена на рис. 8 задаётся уравнением

$$P = 14552 \cdot E - 7662,9$$

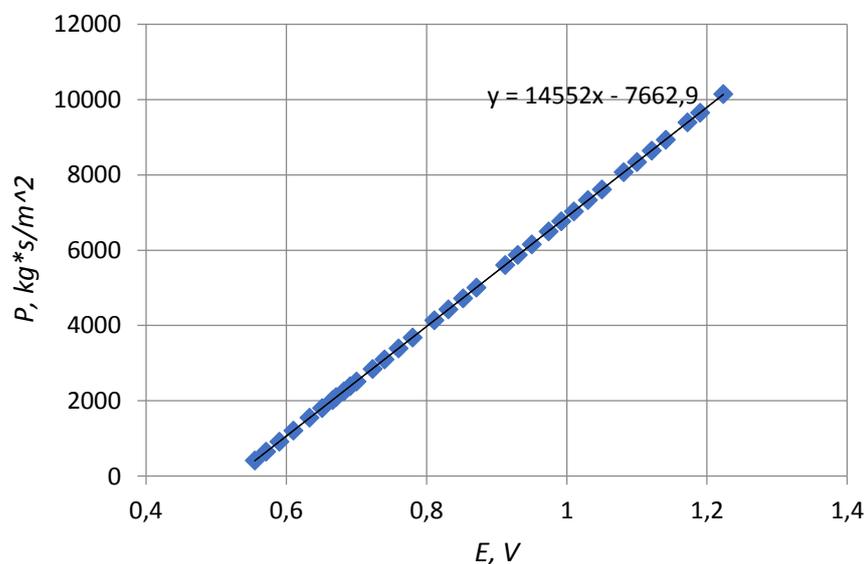


Рис. 8. Калибровочная зависимость датчика давления Siemens KPY-43A (P - показания давлений, E - значения напряжения с пьезорезистивного датчика давления)

4. 2. Описание установки.

Из герметичной камеры, с установленным внутри неё разрядником, откачивался воздух вакуумным насосом. Затем измерялось давление датчиком Метран-55. Данные датчика давления поступали на цифровой мультиметр MAS830

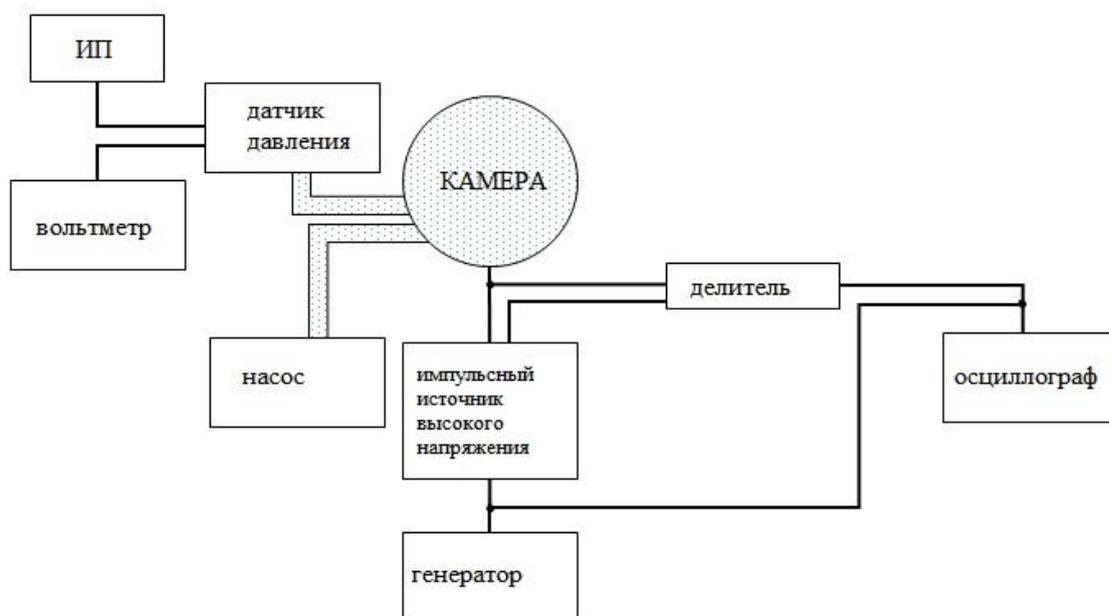


Рис. 9. Схема эксперимента для определения напряжения пробоя в зависимости от давления.

Разряд зажигался с помощью импульсного источника высокого напряжения, схема которого представлена на рис. 10. Схема источника состоит из катушки зажигания (повышающего трансформатора), первичная обмотка которой периодически размыкается, а также биполярного транзистора КТ848А, служащего в качестве ключа. Принцип работы схемы заключается в следующем. При замыкании ключа к первичной обмотке подводится низкое напряжение от генератора, затем разрыв цепи провоцирует образование кратковременного импульса внутри вторичной обмотки. В этот момент напряжение на катушке зажигания увеличивается экспоненциально и достигает достаточно высокого для пробоя напряжения. Для управления транзистором использовался прямоугольный сигнал частотой 1 кГц с генератора. Напряжение с электродов разрядника измерялось двуканальным цифровым осциллографом АК ИП-4122/11V, который подключался в схему через делитель напряжения Tektronix P6015A. Коэффициент деления составлял 1000. Запись измерения производилась при изменении показаний вольтметра примерно на 0,02В.

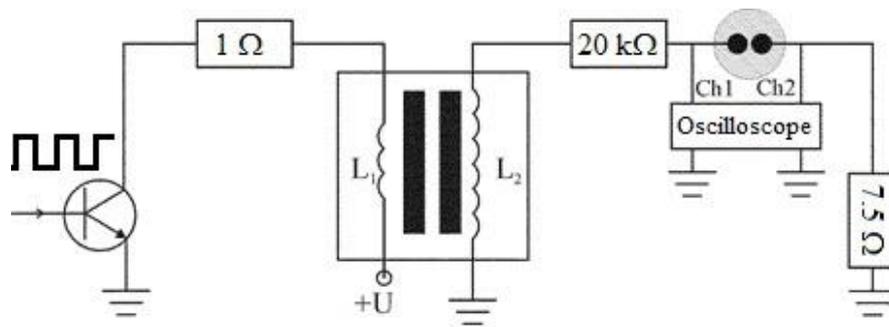


Рис. 10. Схема импульсного источника высокого напряжения

(Данная схема основана на блоке зажигания двигателя автомобиля)

5. Результаты измерений.

5. 1. Эксперимент 1.

Все данные о напряжении пробоя при различных давлениях в камере записывались осциллографом, после обработки данных по экспериментальным точкам была проведена линия аппроксимации полиномом. В итоге была получена зависимость напряжения пробоя от произведения давления на размер диэлектрического промежутка ($p \cdot d$ [тор · см]) для случая $d = 0,059$ см, приведенная ниже на рис. 11.

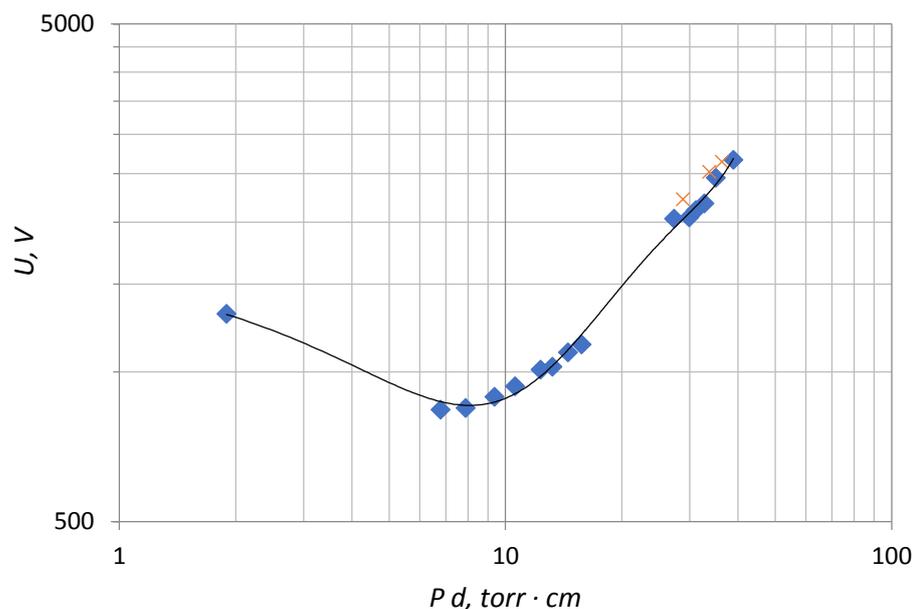


Рис. 11. Зависимость напряжения пробоя от давления при $d = 0,059$ см (Красным на рисунке отмечены экспериментальные точки, выбивающиеся из кривой, которые могут говорить о погрешности, связанной с электромагнитными помехами)

Также было проведено сравнение представленных на рис. 10 результатов с данными из [2]. Минимальное значение напряжения $U \sim 840$ (V) на графике соответствует значению $Pd = 7$ (Торр · см), тогда как данные из [2] показывают, что значению $Pd = 7$ (Торр · см) соответствует значению напряжения $U \sim 720$ (V), а минимальному значению напряжения пробоя соответствует значение $Pd \sim 1$ (Торр · см). Согласно данным из [2], значению Pd порядка 30 (Торр · см) соответствует напряжению U порядка 1800 (V), в нашем эксперименте - $Pd = 30$ (Торр · см) соответствует $U \sim 2000$ (V). Таким образом выяснилось, что данные нашего эксперимента при значениях $Pd \geq 7$ близки к данным, представленным на рис. 2., а при меньших значения сильно отличаются.

5. 2. Эксперимент 2

Во втором эксперименте мы провели те же измерения, но уже для разрядника с другим диэлектрическим промежутком и другими размерами электродов.

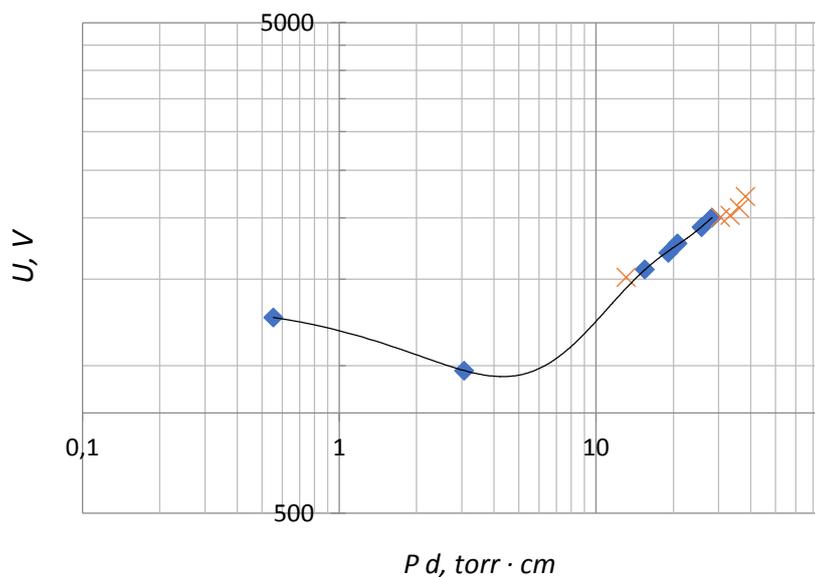


Рис. 12. Зависимость напряжения пробоя от давления при $d = 0,115 \text{ см}$

При сравнении с данными выяснилось, что при значении, например $Pd = 10 \text{ (Торр} \cdot \text{см)}$, значение напряжения пробоя нашего эксперимента и данные из [2] отличаются примерно в 1,5 раза. Также при значении $Pd \sim 3 \text{ (Торр} \cdot \text{см)}$ в нашем эксперименте напряжение оказалось порядка 1 (kV), а по данным из [2] $U \sim 300 \text{ (V)}$.

6. Заключение.

Выполнены измерения напряжения пробоя в зависимости от давления и диэлектрического промежутка для импульсного тлеющего разряда. Давление измерялось тензорезистивным датчиком Метран-55. В работе была получена калибровочная зависимость датчика давления, которая использовалась в измерениях.

Различия в результатах нашего эксперимента могут быть связаны с неустойчивостью разряда, в нашем случае имело место быть ионизационно-перегревной или тепловой неустойчивости. Механизм такой неустойчивости приводит к образованию токовых шнуров (контракции разряда) с резко повышенной плотностью тока. Также при приближении давления к атмосферному наблюдалась нестабильность горения разряда, которая также приводила к элетромагнитным помехам, об этом нам говорят выбивающиеся из кривой точки при больших значениях Pd . И так, как данные, полученные во втором эксперименте, сильнее отличаются от табличных, то можно предположить, что геометрические размеры электродов вносят значительный вклад в величину напряжения пробоя.

7. Список Литературы

1. Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В. Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях. М.; Ижевск, 2006. 304 с.
2. Физика газового разряда. Научное издание / Райзер Ю. П. – 3-е изд. перераб. и доп. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. – 736 с.
3. Князев Б. А. Низкотемпературная плазма и газовый разряд: Учебное пособие / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2003. 290 с.
4. Датчики давления Метран-55: руководство по эксплуатации СПГК.5175.000.00 РЭ, версия 1.9. 60.