

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Тургенева Снежанна Андреевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Конфигурация потоков ионов в неоднородном электрическом поле**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18306

**Научный руководитель:**

к. ф.-м. н. Карасёв В. В.

Оценка научного руководителя

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

д. ф. –м. н. Терещенко О. Е.

Оценка преподавателя практикума

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

\_\_\_\_\_ Итоговая оценка

к.т.н. Астрелин В.Т.

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск, 2019

## **Аннотация**

Целью работы являлось исследование процессов, связанных с коронным разрядом, в частности, распределения зарядов, конфигурации поля, плотности ионных потоков.

Изучались пространственная картина силовых линий разряда, распределение плотности ионного тока на заземленном электроде, различия протекания процесса в электроположительном и электроотрицательном газах. Первая установка состояла из системы электродов «игла – плоскость», а другая из плоского конденсатора, в верхнюю пластину которого были вставлены иголки, а нижняя пластина была заземлена. К верхнему электроду был подключен генератор постоянного напряжения -10 кВ. В воздушной среде проведена серия измерений тока с двух участков заземленного электрода в виде фольги с разрезом при последовательных перемещениях иглы по горизонтали параллельно разрезу. Получена зависимость суммарного тока с сегмента объёмной фигуры плотности тока от расстояния до проекции острия иглы на плоскость нижнего электрода. Получены профили яркости изображений пятна по диаметру в разные моменты времени. Аналогичные эксперименты, проведенные в среде азота, показали, что в электроположительном газе пятно не образуется, а ток превышает ток в воздухе более, чем на порядок. Получены фотографии пятен при наклоне иглы, результаты подтверждают данные о локализации зоны образования ионов вблизи осевой точки острия иглы.

Ключевые слова: коронный разряд, ионный ветер.

## Оглавление

1. Введение.....	4
2. Основные обозначения .....	6
3. Описание установки и методики проведения эксперимента.....	6
4. Расчеты и численные оценки исследуемого процесса .....	7
4.1 Оценка заряда иголки .....	7
4.2 Оценка плотности поверхностного заряда на нижнем электроде .....	8
4.3 Динамика движения иона.....	9
4.4 Оценка скорости нейтральных воздушных молекул .....	11
4.5 Оценка объемного заряда .....	11
5. Результаты эксперимента и обсуждения .....	13
5.1 Зависимость тока через нижний электрод от расстояния до иглы .....	13
5.2 Измерение тока через нижний электрод.....	13
5.3 Обработка фотографий в течение процесса .....	15
5.4. Пятно при наклоненной игле .....	17
5.5 Разряд в среде, заполненной азотом.....	18
6. Выводы.....	20
7. Список литературы .....	21

## 1. Введение

Данная работа посвящена исследованию процессов, происходящих в поле отрицательного коронного разряда в системе электродов «игла – плоскость». Эта система создает поле с большим градиентом потенциала, с резко неоднородной напряженностью вблизи иглы из-за большой кривизны её поверхности. Коронный разряд – это самостоятельный разряд в газе, возникающий вблизи острия, когда напряженность достигает определенного уровня. При этом четко выделяются две зоны, показанные на рис. 1, схематично изображающем процесс.



Рисунок 1. Движение ионов при коронном разряде

В непосредственной близости к иглке располагается активная зона, содержащая свечение короны, указывающее на разряд, то есть образование ионов. Остальная часть - внешняя зона, в ней напряженность поля не настолько высока, чтобы образовывались новые ионы, поэтому в ней дрейфуют отрицательные ионы и электроны, появившиеся ранее.

При отрицательном коронирующем электроде важно учитывать природу газа, в котором протекает процесс. В электроотрицательном газе свечение короны вызвано столкновением и ионизацией газовых молекул и летящих от поверхности электронов. Эти электроны выбиваются из коронирующего электрода в результате вторичной ион-электронной эмиссии при ударе о поверхность положительного иона. Каждый электрон порождает лавину, ионизируя несколько молекул в области высокого поля (зоны ионизации). При достаточной энергии взаимодействия образуются новые пары «электрон – положительный ион». Двигающиеся от иглы электроны вне зоны ионизации

быстро присоединяются к газовым молекулам кислорода ввиду его электроотрицательности, и это облако движется к плоскому заземленному электроду, создавая объемный отрицательный заряд в области между иглой и плоским электродом.

В электроположительных газах (азот, водород, инертные газы) при отсутствии примесей отрицательные ионы практически не образуются, поэтому заряд во внешней зоне коронного разряда создается за счет свободных электронов. Подвижность электронов в несколько раз превышает подвижность отрицательных ионов, поэтому плотность объемного заряда вблизи острия гораздо меньше, чем в случае электроотрицательного газа. Т. к. объемный заряд мал, а именно по причине его наличия ограничивается ток через нижний электрод, то разрядный ток в электроположительном газе превышает ток, в частности, в воздухе.

Однако наличие в электроположительном газе примеси порядка сотых долей процента резко снижает силу разрядного тока. Поэтому в воздухе, содержащем около 80% азота, коронный разряд происходит, как в электроотрицательном газе.

Так как поле коронного разряда представляет собой поле с объемными зарядами, в рамках данной курсовой приходится делать упрощения, чтобы полуколичественно рассмотреть и проанализировать данную задачу.

Цель работы: исследование процессов, связанных с коронным разрядом, в частности, распределения зарядов, конфигурации поля, плотности ионных потоков.

Задачи:

- 1) провести измерения тока с двух участков заземленного электрода в виде фольги с разрезом;
- 2) получить фотографии пятна, образующегося во время разряда по мере протекания эксперимента;
- 3) проанализировать полученные результаты и сравнить их между собой, провести дополнительные эксперименты для уточнения.

## 2. Основные обозначения

$T$  – температура среды;

$p$  – давление среды;

$t$  – время;

$\mu_v = 1,86 \cdot 10^{-4} \frac{\text{дин} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}$  – динамическая вязкость воздуха;

$g = 981,45 \frac{\text{см}}{\text{с}^2}$  – ускорение свободного падения;

$\rho_v$  – плотность воздуха;

$e = 4,803 \cdot 10^{-10} \frac{\text{см}^{3/2} \Gamma^{1/2}}{\text{с}}$  – заряд электрона;

$C_c$  – поправка Каннинггема;

$E = 33,356 \frac{\Gamma^{1/2}}{\text{см}^{1/2} \text{с}}$  – напряженность электрического поля между электродами;

$Z = 420 \frac{\text{см}^{1/2} \Gamma^{1/2}}{\text{с}^2}$  – подвижность воздушных ионов;

$r_n = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см};$

$U = -33,356 \frac{\text{см}^{1/2} \Gamma^{1/2}}{\text{с}}$  – напряжение на блоке питания;

$\lambda = 7 \cdot 10^{-6} \text{ см}$  – длина свободного пробега молекул воздуха.

## 3. Описание установки и методики проведения эксперимента

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

Экспериментальная установка состоит из блока питания с напряжением  $U$  (1, рис. 2), двух микроамперметров, предметного столика (2, рис. 2) с подвижками, на котором закреплена пластинка, покрытая алюминиевой фольгой, иголки (4, рис. 2), источника света (5, рис. 2) и фотоаппарата (6, рис. 2). При измерениях тока и фотографировании иголка была удалена от столика на 7 мм. В предполагаемом эксперименте на верхний электрод подается высокое

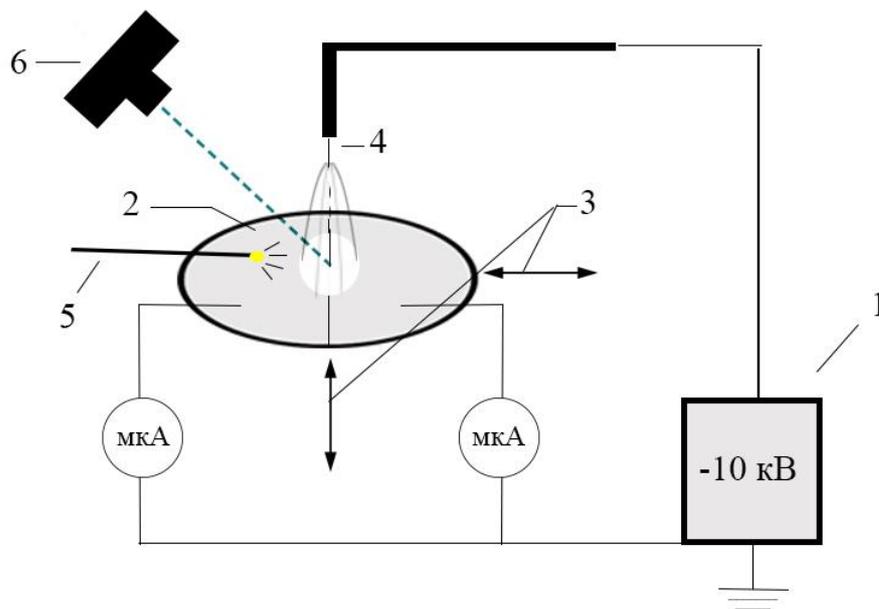


Рисунок 2. Блок-схема экспериментальной установки

отрицательное напряжение, в результате чего отрицательные ионы под действием электрической силы устремляются к заземленному электроду, создавая через него ток. Иглу можно двигать, изменяя таким образом проекцию центра острия на нижнюю пластину.

Для первого эксперимента произведен тонкий прямой разрез фольги на две части, каждая из которых соединена с микроамперметрами, после чего был измерен ток через два участка фольги. Из этих данных получена зависимость тока от расстояния до проекции центра иглы на фольгу. В другой серии измерений, без разреза на фольге, получены фотографии пятна (предположительно, оксида алюминия), которое появлялось в результате взаимодействия ионов и фольги. Оцифровав фотографии и взяв значения яркости по диаметру пятна, можно сделать вывод об интенсивности реакции в каждой точке.

## 4. Расчеты и численные оценки исследуемого процесса

### 4.1 Оценка заряда иголки

Т. к. основной заряд скапливается на острие, задачу можно свести к нахождению заряда шара с известным потенциалом  $U$  и радиусом  $r_{и}$ :  $Q = U \cdot r_{и}$ .

Здесь  $r_{и} = 5 \cdot 10^{-3}$  см – радиус острия, если считать, что нижнюю часть иглы можно представить шариком и выходящим из него конусом.

$$\text{Получаем } Q \approx -33,356 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \approx -0,167 \frac{\text{см}^{3/2} \Gamma^{1/2}}{c}.$$

Поскольку помимо острия заряд частично накопится на остальной части иглы, следует сделать поправку к оценке. Учитывая, что радиус остальной части иглы 0,6 мм, а ее высота 20 мм, можем примерно посчитать эффективный радиус шара, который будет иметь такой же заряд, как и игла. Получим, что реальный заряд превышает первоначальную оценку примерно в 49 раз, то есть  $Q \approx -8 \frac{\text{см}^{3/2} \Gamma^{1/2}}{c}$ .

## 4.2 Оценка плотности поверхностного заряда на нижнем электроде

Оценку произведем без учета объемного заряда, создаваемого воздушными ионами. Представим иголку точечным зарядом  $Q$ , находящимся на расстоянии  $h$  от проводящего полупространства  $z < 0$  (рис. 3).

Т. к. поле в проводящем полупространстве  $E_i = 0$  и постоянный потенциал можно принять равным 0, областью определения искомого поля можно принять полупространство  $z > 0$  без точки, в которой находится заряд.

Для нахождения поля воспользуемся уравнением Лапласа:  $\Delta\phi = 0$  и граничными условиями:  $\phi|_{z=0} = 0$ ,  $\oint_S E_n dS = 4\pi Q$ .

Далее, воспользовавшись методом изображений, найдем потенциал во всем пространстве:  $\phi = \frac{Q}{r} - \frac{Q}{r_1}$ , где  $r$  – расстояние от заряда,  $r_1$  – расстояние заряда-изображения до точки пространства.

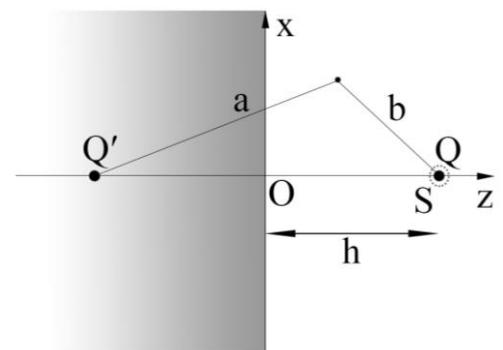


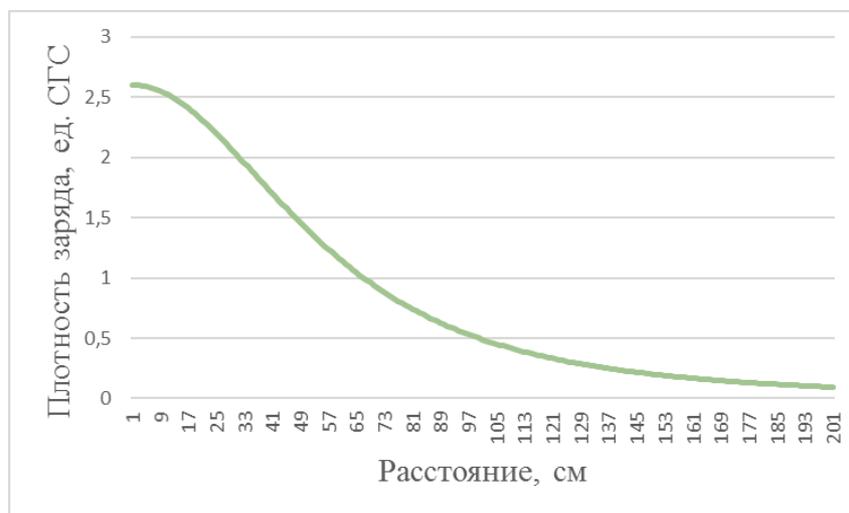
Рисунок 3. Задача о точечном заряде и проводящем полупространстве

Плотность индуцированных на поверхности зарядов определим из граничного условия:  $\frac{\partial\phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 4\pi\sigma$ . Получим  $\sigma = -\frac{Q}{2\pi} \frac{h}{(h^2+r^2)^{3/2}}$ .

Для высоты  $h = 0,7$  см получаем распределение заряда по пластине, представленное на рис. 4. 5% от максимального значения плотности заряда достигается на расстоянии  $\approx 1,8$  см. Задача полностью электростатическая, но по данному распределению мы можем оценить распределение силовых линий, по которым, с поправкой на упрощенную оценку поля, и будут двигаться ионы, заряженные в зоне короны.

Рисунок 4. Идеализированное распределение заряда по пластине

### 4.3 Динамика движения иона.



Из справочных данных известно, что характерная подвижность воздушного иона  $Z = 420 \frac{\text{см}^{1/2} \Gamma^{1/2}}{\text{с}^2}$ .

Это значит, что в поле  $E = 33,356 \frac{\Gamma^{1/2}}{\text{см}^{1/2} \text{с}}$  ион должен двигаться со скоростью  $v = Z \cdot E \approx 140 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

С другой стороны, скорость можно найти из уравнения движения иона в электростатическом поле.

Для частицы с малым числом Рейнольдса верны уравнения:

$$m \frac{dv}{dt} = F_{\text{эл}} - F_{\text{с}}; \quad (*)$$

$$F_{\text{эл}} = eE, \quad F_{\text{с}} = 3\pi\mu_{\text{в}}dv.$$

При этом предполагается, что среда с твердыми частицами сферической формы непрерывна, несжимаема, а также является вязкой и бесконечной. Когда

размеры частицы приближаются к молекулярным, основным источником сопротивления становится не вязкость среды, а сечение частицы в соответствии с моделью Ньютона для лобового сопротивления. Чтобы учесть этот эффект, в уравнение Стокса вводится коэффициент  $C_c$  – поправка Каннингема:

$$F_c = 3\pi\mu_v dv/C_c;$$

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} \left[ A + Q \exp\left(-\frac{bd}{2\lambda}\right) \right],$$

$$\text{где } A = 1,257, Q = 0,400, b = 1,10.$$

$$C_c = 1 + \frac{2 \cdot 7 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-8}} \left[ 1,257 + 0,4 \exp\left(-\frac{1,1 \cdot 3 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 7 \cdot 10^{-6}}\right) \right] = 773,827.$$

Скорость, установившаяся в электростатическом поле, находится из условия:

$$F_{эл} = F_c.$$

$$v_{и} = \frac{eEc_c}{3\pi\mu_v d}; v_{и} = \frac{4,803 \cdot 10^{-10} \cdot 33,356 \cdot 773,827}{3 \cdot 3,1416 \cdot 18,6 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 10^{-8}} = 2357,35 \frac{м}{с}.$$

Этот результат превышает скорость, посчитанную по справочным данным, в 16,84 раз. Это несоответствие можно объяснить взаимодействием иона с нейтральными молекулами, которое приводит к их поляризации и дополнительному взаимодействию. Чтобы откорректировать это несоответствие, вместо реального диаметра при расчете сил, действующих на ион, будем брать «действующий» диаметр  $d_d \approx 4,108d$ ,  $C_c = 188,796$ .

Получим зависимость скорости и координаты от времени:

$$v(t) = \frac{eE}{m} \tau \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \tau = \frac{mC_c}{3\pi\mu_v d_d};$$

$$x(t) = \frac{eE}{m} \tau \left( t + \left( e^{-\frac{t}{\tau}} - 1 \right) \right);$$

$$\tau = \frac{4,81 \cdot 10^{-23} \cdot 188,796}{3 \cdot 3,1416 \cdot 18,6 \cdot 10^{-5} \cdot 1,23 \cdot 10^{-7}} = 4,21 \cdot 10^{-11} \text{ с}.$$

Время установления постоянной скорости очень мало, то есть в дальнейших рассмотрениях можно считать, что ион движется квазистационарно, то есть при рассмотрении следующих задач можно считать, что равнодействующая сил равна нулю.

#### 4.4 Оценка скорости нейтральных воздушных молекул

В результате возникновения коронного разряда импульс, переданный заряженным частицам кулоновской силой, передается и нейтральным частицам, в результате чего они приобретают дополнительную скорость, направленную к заземленному электроду.

Если считать, что вся энергия от источника расходуется на кинетическую энергию движения ионов и молекул воздуха, верно:

$$\frac{\frac{m_i v_i^2}{2} n_i V + \frac{m_0 v_0^2}{2} n_0 V}{\frac{h}{v_i}} = IU;$$

$$v_0 = \left( \frac{2 \frac{IUh}{v_i} - m_i v_i^2 n_i V}{m_0 n_0 V} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{2IUh - m_i v_i^3 n_i V}{v_i m_0 n_0 V} \right)^{\frac{1}{2}};$$

$$n_i = \frac{j}{eZE} = \frac{I}{eZES} = \frac{203858,86}{4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 420 \cdot 33,356 \cdot 8,8} = 0,34 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{см}^3};$$

$$n_0 = \frac{N_{\text{AP}}}{RT} = \frac{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 101325}{8,31 \cdot 295,15} = 248,78 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{м}^3} = 2,48 \cdot 10^{19} \frac{1}{\text{см}^3};$$

$$v_0 \approx \left( \frac{2 \cdot 20,39 \cdot 10^4 \cdot 33,356 \cdot 0,7}{14 \cdot 10^3 \cdot 4,81 \cdot 10^{-23} \cdot 2,48 \cdot 10^{19} \cdot 8,8} \right)^{\frac{1}{2}} = 2,54 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

Получаем, что в коронном разряде на частицы также оказывает влияние и поток воздуха, т. е. осаждение аэрозольных частиц происходит быстрее. К тому же, частицы, попавшие в пространство над острием, увлекаются этим потоком вниз, где они уже смогут зарядиться.

#### 4.5 Оценка объемного заряда

Концентрация ионов:  $n = \frac{j}{eZE} = \frac{I}{eZES}$ , где  $j$  – плотность тока,  $S$  – площадь потока ионов. Из оценки плотности в пункте  $S \approx \pi \cdot 1,77^2 = 9,84 \text{ см}^2$ . Как будет видно из эксперимента, ток через нижний электрод  $I \approx 18,6 \cdot 10^4 \text{ ед. СГС}$ .

Приближенно можем считать, что объем, занимаемый объемным зарядом, равен объему цилиндра с высотой  $a = 0,7 \text{ см}$ .

$$\text{Тогда количество ионов } N = nV = \frac{Ia}{eZE}, \text{ объемный заряд } Q_0 = Ne = \frac{Ia}{ZE}.$$

$$Q_0 = \frac{18,6 \cdot 10^4 \cdot 0,7}{420 \cdot 33,356} \approx 9,29 \frac{\text{см}^{3/2} \Gamma^{1/2}}{\text{с}}.$$

Это верхняя оценка объемного заряда, так как в реальности ионы не занимают все пространство между электродами. Посчитанная величина по порядку совпадает с оценкой заряда иглы, а значит, необходимо учитывать его влияние на поле.

Будем считать, что при отсутствии любых внешних сил, кроме силы взаимодействия с иглой, ионы двигаются по силовым линиям. Крайнюю силовую линию можно приближенно считать близкой к прямой, когда ион находится на удалении от иглы и приближается к стенке.

Кулоновское взаимодействие с объемным зарядом можно оценить сверху, считая объемный заряд точечным зарядом  $Q_0$ . Поле точечного заряда:  $E_0 = \frac{Q_0}{r^2}$ ,

$$\text{Из уравнения (*): } v = \frac{Q_0 C c e}{3 \pi r^2 \mu_B d_d}, v = \frac{9,29 \cdot 188,796 \cdot 4,803 \cdot 10^{-10}}{3 \cdot 3,1416 \cdot 4 \cdot 1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 1,23 \cdot 10^{-7}} \approx 9,8 \text{ м/с}.$$

Т. к. скорость иона без влияния объемного заряда равна 140 м/с, наличие объемного заряда не сильно отклоняет его от траектории, совпадающей с силовой линией.

## 5. Результаты эксперимента и обсуждения

### 5.1 Зависимость тока через нижний электрод от расстояния до иглы

Перед проведением измерений была получена зависимость тока от расстояния иглы до нижнего электрода. Результаты представлены на рис. 5. Видно, что в области маленьких расстояний, в которой и были проведены все последующие измерения, ток резко меняется даже от небольшого изменения расстояния, что могло вызвать погрешности.

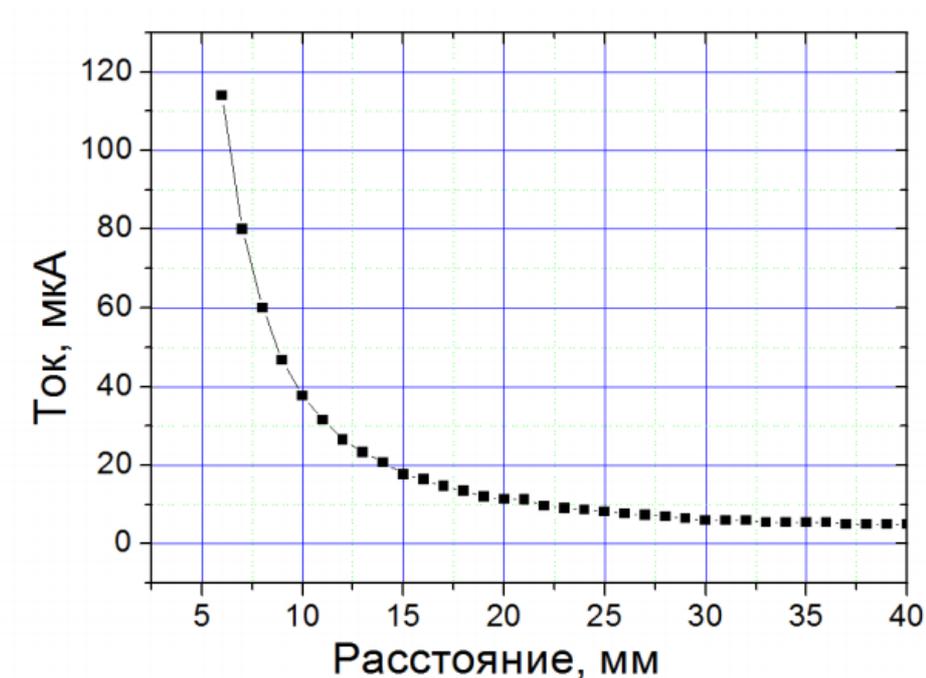


Рисунок 5. Зависимость тока через заземленный электрод от расстояния до иглы

### 5.2 Измерение тока через нижний электрод

В первой серии был измерен ток через два участка фольги при смещении иглки от центра в обе стороны на расстояние  $r$ . По значениям каждого и двух микроамперметров построена зависимость тока через область фольги в

зависимости от расстояния  $r$  от точки  $O$ , где  $O$  – такое положение иглки, что центр находится над разрезом. Они представлены на рис. 6, 7.

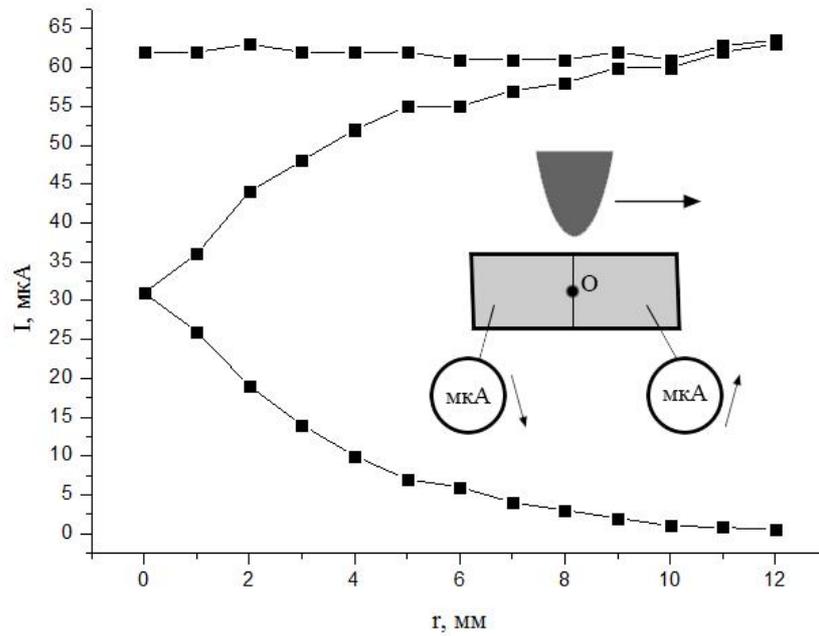


Рисунок. 6. Ток через оба амперметра при движении иглки в одну сторону и суммарный ток

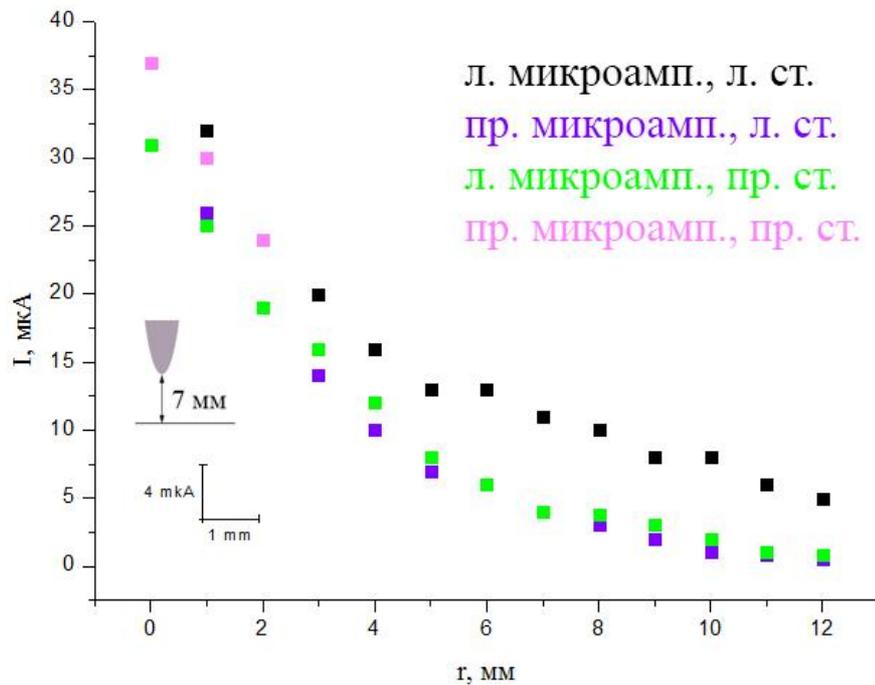


Рисунок. 7. Зависимость тока  $I$  от расстояния  $r$

Из рис. 6 видно, что сумма показаний амперметров сохраняется, то есть разрез практически не влияет на точность измерений.

Разницу между полученными зависимостями на рис. 7 можно объяснить возможным отклонением иглы на малый угол, вследствие чего ток между двумя областями распределяется несимметрично.

5% от максимального значения тока достигается примерно на расстоянии 1,2 см.

Это важный параметр, который необходимо учесть при создании установки для осаждения аэрозольных частиц. Иголки нужно располагать на удалении, не превышающем это радиус, чтобы частицы постоянно находились в электрическом поле.

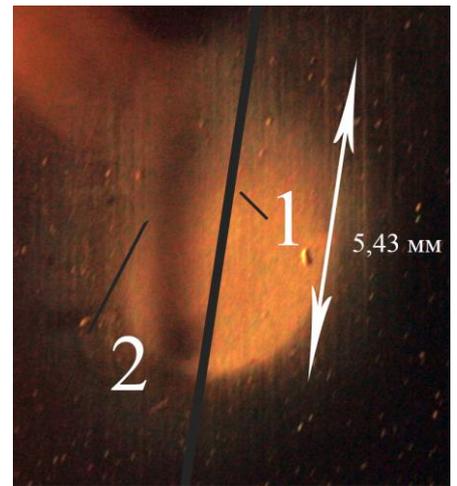


Рисунок 8. Фотография пятна сверху

### 5.3 Обработка фотографий в течение процесса

В дальнейших измерениях фольга была цельной, т. к. нужно было проанализировать изменение пятна, которое образовывалось в первом измерении.

В результате взаимодействия ионов с фольгой, получается пятно белого цвета, размеры и яркость которого менялись с течением времени. Пример фотографии представлен на рис. 8. На нем 1 – прямая, по которой ведется сканирование, 2 – игла сверху.

В [4] при помощи масс-спектрометрии выяснено, что в области разряда за время, которое требуется ионам, чтобы достичь нижнюю пластину, образуются отрицательные ионы кислорода  $O^-$  и  $O_2^-$ , так что, предположительно, пятно – результат реакции кислорода и алюминия из фольги.

После оцифровки были получены значения яркости по диаметру (рис. 9).

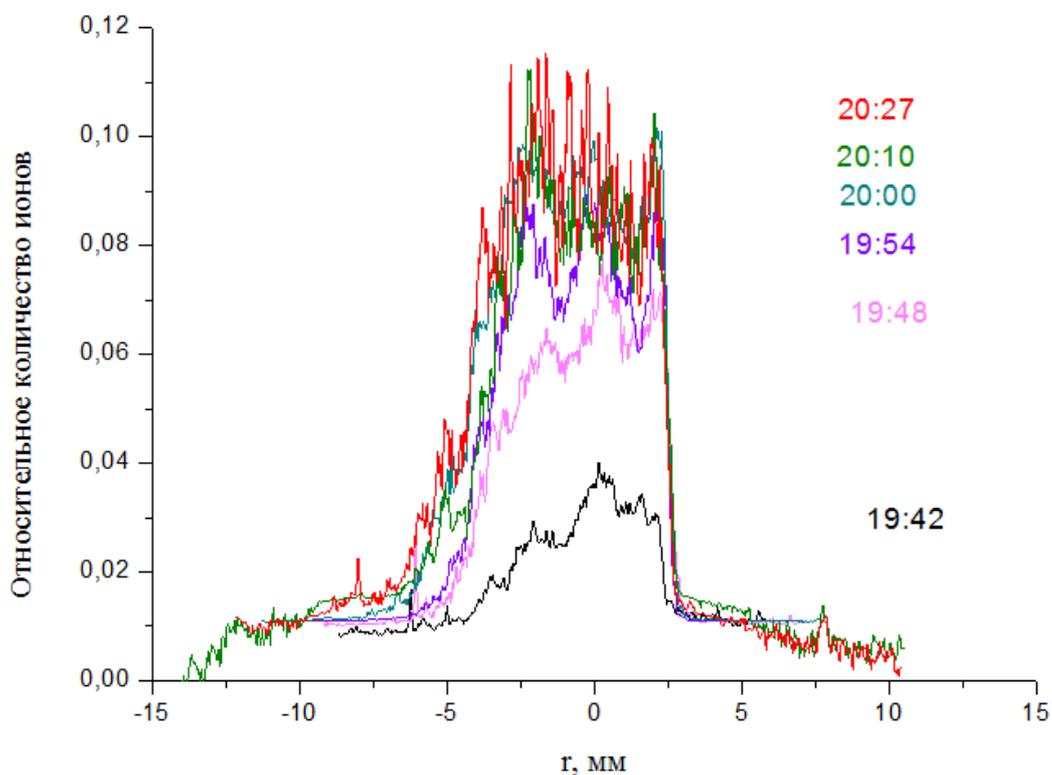


Рисунок 9. Яркостные характеристики пятнышка в разное время

Так как изображение фотоаппарата фиксирует лишь количество фотонов, которые рассеиваются на слое фольги, полученная зависимость не будет отражать соотношение между количествами ионов, пришедших в разные точки пятнышка, а лишь покажет их примерное соотношение в зависимости от расстояния до центра, координату, где поток ионов был наибольшим, а также расстояние от центра пятнышка, на котором уже нет следов химической реакции, что совсем не означает, что ионы не достигают фольгу на больших расстояниях.

Видно, что вершина пятнышка находится под центром иглы. Асимметрия вызвана, предположительно, небольшим наклоном иглы. Диаметр пятнышка, зафиксированного последним, равен 9,95 мм, что меньше диаметра «токового пятнышка» примерно в 2,42 раза. Значит, ионам на крайних силовых линиях не хватило энергии для взаимодействия с фольгой.

На рис. 10 построена зависимость диаметра пятнышка от времени разряда.

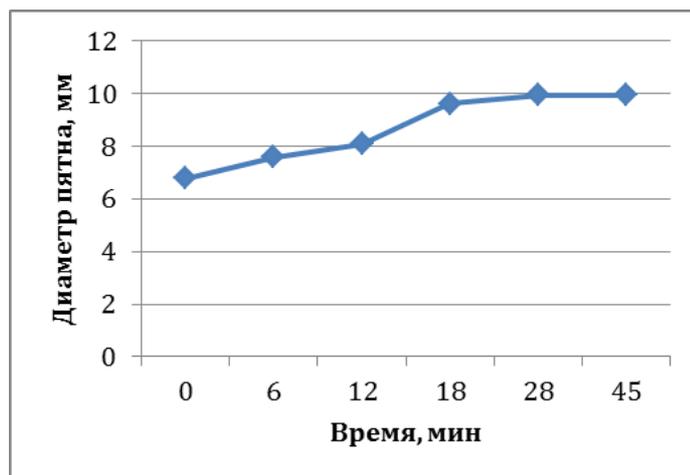


Рисунок 10. Зависимость диаметра пятна от времени

#### 5.4 Пятно при наклоненной игле

Был проведен опыт с иглой, наклоненной под углом  $\approx 67,8^\circ$  к нижней плоскости и расположенной на расстоянии 7 мм от нижнего электрода. Получена достаточно нетипичная картина пятна, изображенная на рис. 11. Все пятно смещено в направлении наклона оси иглы, так что проекция центра иглы находится с краю от начала пятна.

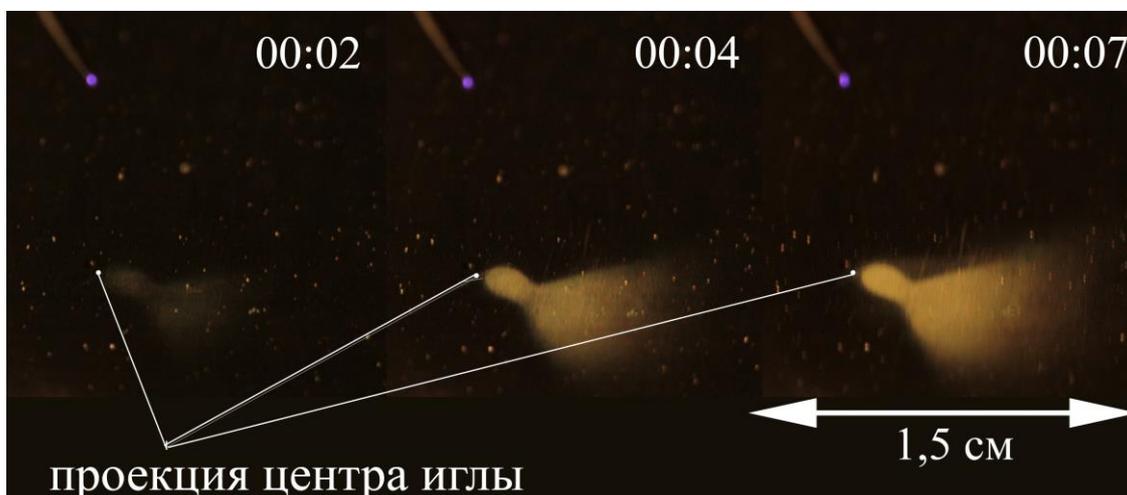


Рисунок 11. Пятно на фольге от иглы под наклоном

В работе [4] представлена фотография чехла коронного разряда у поверхности шарового электрода, см. рис. 12. Там диаметр шара 0,7 мм, межэлектродное расстояние 20 мм, напряжение -26 кВ. Также в этой работе представлено моделирование и анализ отрицательного коронного разряда. Показано, что очаг короны (максимум напряженности поля) расположен вблизи

полюса шара. Вне приосевой области ионизация практически не происходит, а электроны прилипают к молекулам кислорода, создавая облако объемного заряда.

Привязанность зоны ионизации к осевой точке иглы указывает на то, что жгут тока ионов должен иметь существенную составляющую вдоль оси иглы, что и объясняет общее смещение пятна в случае наклона иглы. Крайние силовые линии, по которым движутся ионы, схематично изображены на рис. 13. Однако, тонкие детали формы пятна, видимо, следует объяснять комплексным действием электростатического поля, газодинамикой ионного ветра. Эта задача представляет интерес с точки зрения фокусировки аэрозольных частиц в потоке. Более детальное изучение требует дополнительного исследования.

Визуализация ионных потоков на поверхность заземленного электрода – достаточно информативный и быстрый метод для проверки теоретических моделей при асимметричном расположении электродов. Предложенный метод является не описан в работах, где изучаются подобные системы с коронным разрядом.

## 5.5 Разряд в среде, заполненной азотом

В данном эксперименте изучался процесс в азоте, электроположительном газе. Была собрана установка, представленная на рисунке 14.



Рисунок 12. Фото чехла отрицательного коронного разряда у поверхности шарового электрода

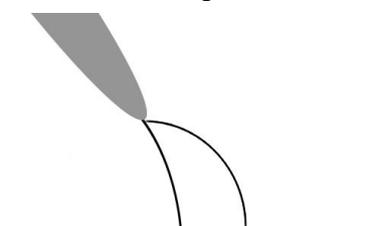


Рисунок 13. Крайние силовые линии иглы под наклоном

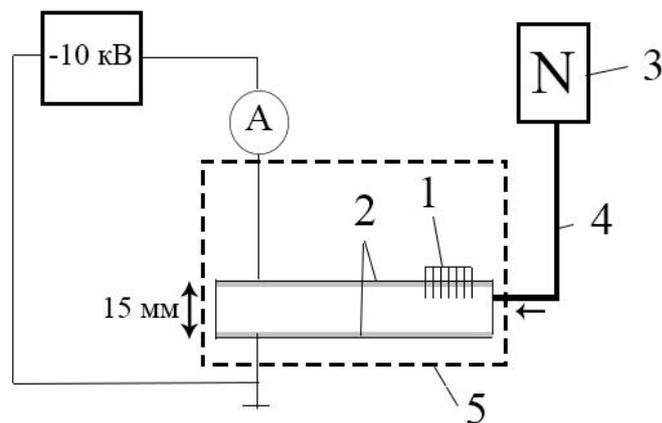


Рисунок 14. Блок-схема установки для проведения дополнительного эксперимента

По сравнению с предыдущей установкой, вместо системы электродов «игла – плоскость» установлен макет электростатического осадителя аэрозольных частиц (5, рис. 14), который состоит из двух непроводящих пластинок, покрытых алюминиевой фольгой (2, рис. 14), системы иголок, закрепленных на верхней пластине (1, рис. 14). Напряжение подается на верхнюю пластину, микроамперметр подключен к нижней, заземленной, пластине. К макету через трубку (4, рис. 14) подводится азот из баллона (3, рис. 14).

Фотография процесса представлена на рисунке 15. На нем 1 – электрод, на который подается напряжение, 2 – заземленный электрод, 3 – корона одной иглой, 4 – отражение свечения на пластинах конденсатора. При подаче напряжения корона появлялась у 7 иголок, суммарный ток через заземленный электрод составлял  $\approx 6$  мА. В аналогичном эксперименте в воздухе ток составлял около 260 мкА. Разрядный ток в азоте намного сильнее, это объясняется тем, что азот – электроположительный газ, поэтому заряд во внешней зоне создается электронами. Их подвижность в несколько раз превышает подвижность отрицательных ионов, поэтому плотность объемного заряда гораздо меньше, чем в случае электроотрицательного газа, каким и можно считать воздух из-за наличия кислорода. Усиление разрядного тока объясняется

тем, что объемный заряд вблизи электрода, который его ограничивает, уменьшился по сравнению с воздухом.

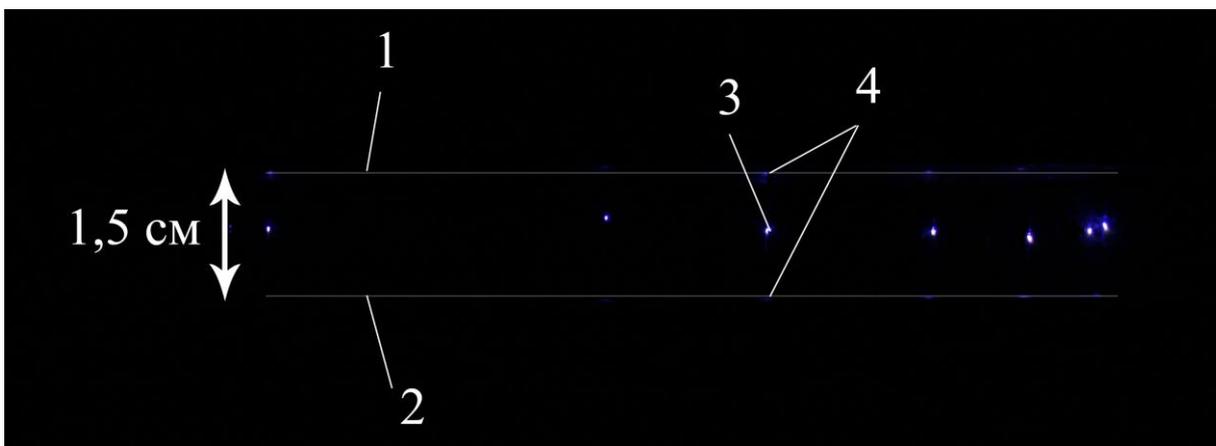


Рисунок 15. Разряд в среде азота

В азотной среде свечение иголок было гораздо больше, чем в воздушной. Это говорит о большем количестве энергии, выделяющейся в зоне ионизации.

Пятен на нижнем электроде обнаружено не было. Это значит, что пятна в воздушной среде появлялись в результате взаимодействия алюминия или оксида алюминия с кислородом и, возможно, с его соединениями с азотом и водородом.

## 6. Выводы

В электростатической задаче «точечный заряд – плоскость» мы получили, что диаметр круга  $d_1$  на нижней пластине, на котором накапливается основная часть заряда, равен примерно 3,6 см. В проведенных экспериментах были измерены диаметр основания «токового конуса»  $d_2$  (примерно 2,4 см), а также диаметр пятна  $d_3$ , который образовался в ходе разряда (примерно 1 см).

Значение  $d_1$  показывает, на какое расстояние от проекции точечного заряда на плоскость уходят силовые линии, которые входят в пластину там, где собрана большая часть индуцированного заряда в электростатическом случае. Экспериментально полученный диаметр  $d_2$  меньше, это можно объяснить локализацией зоны ионизации вблизи осевой точки иглы, вследствие чего ионы занимают не все силовые линии, а только те, что находятся ближе к оси. Т. к.  $d_2$  не превосходит  $d_1$ , можно заключить, что влияние отрицательного объемного

заряда на траекторию ионов и электронов незначительно, как и предполагалось в оценке. Различие «токового» и оксидного пятен означает лишь, что ионы на крайних силовых линиях обладают невысокой энергией.

Измерения тока и фотографии пятна подтвердили, что даже при малом смещении иглы поле становится заметно асимметричным.

При наклоне зафиксировано сильно искаженное и смещенное от центра пятно. Это объясняется перераспределением силовых линий, заполненных ионами с преимущественным направлением вдоль оси иглы.

Эксперимент в азотной среде показал, что в образовании пятна в воздухе участвуют атомы кислорода. Также мы убедились, что в электроположительных газах происходит увеличение разрядного тока.

## **7. Список литературы**

1) П. Райст. «Аэрозоли. Введение в теорию». Перевод с английского под редакцией д-ра хим. наук Б. Ф. Садовского. Москва «Мир», 1987. 277 стр.

2) Н. А. Фукс. «Механика аэрозолей». Издательство Академии наук СССР, Москва, 1955. 351 стр.

3) И. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Мирзабекян, М. М. Пашин. «Основы электрогазодинамики дисперсных систем». «Энергия» Москва, 1974. 478 стр.

4) Ю. К. Стишков, А. В. Самусенко, И. А. Ашихмин. «Коронный разряд и электрогазодинамические течения в воздухе». «Успехи физических наук», том 188, № 12, стр. 1331 – 1345 (2018).