

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Стародубцева Эжена Сергеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение параметров движения микрочастиц в неоднородном поле  
коронного разряда**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19311

**Научный руководитель:**

к. ф.-м. н., Карасев В. В.

Оценка научного руководителя

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г..

**Преподаватель практикума:**

Руменская М. С.

Оценка преподавателя практикума

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г..

**Куратор практикума:**

к. т. н., Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г..

Новосибирск, 2020 г.

## **Оглавление**

1. Введение .....	4
2. Обозначения .....	5
3. Теоретическая часть .....	6
3.1. Поле и заряд иглы в модели гиперboloида .....	6
3.2. Оценка скорости увлекаемых ионным ветром молекул воздуха .....	8
3.3. Динамика зарядки частицы и предельный заряд аэрозольной частицы в электрическом поле .....	9
3.4. Движение заряженной частицы под действием поля в воздухе.....	9
4. Экспериментальная часть.....	11
4.1. Описание экспериментальной установки .....	11
4.2. Осаждение аэрозоля в пробоотборнике .....	12
4.3. Анализ пятна горения разряда .....	15
4.4. Определение зоны коронного разряда.....	17
5. Выводы и заключение .....	19
Список литературы .....	19

## Аннотация

Предметом исследования в данной работе является движение микрочастиц и ионов в поле коронного разряда, который создается на острие иглы, находящейся под напряжением  $-10$  кВ.

В рамках упрощенной модели процесса проведены оценочные расчеты заряда и поля иглы, скорости ионов и ионного ветра, объемного заряда. Приведены уравнение движения аэрозольной микрочастицы в электростатическом поле пробоотборника и расчет времени движения частиц от их диаметра.

В эксперименте с регистрацией пятен оксидного осадка от двух близкорасположенных игл показана деформация пятен, вследствие «отталкивания зонтиков» из-за кулоновского взаимодействия объемных зарядов. Пространственное отклонение ионов соответствует расчетной оценке.

Зарегистрированы размеры зоны ионизации коронного разряда при вариации расстояния иглы относительно заземленного электрода. Показана корреляция с величиной тока, протекающего через иглу.

С помощью пробоотборника проведен эксперимент по зарядке и осаждению микрочастиц NaCl из аэрозольного потока в поле отрицательного коронного разряда. Оценочный расчет длины осаждения аэрозоля в канале пробоотборника согласуется с продольным профилем интенсивности рассеивания лазерного луча и плотностью осаждения аэрозоля по длине канала.

Ключевые слова: коронный разряд, электростатическое поле, аэрозоли, ионы, ионный ветер

## 1. Введение

Коронным разрядом называют самостоятельный газовый разряд, возникающий в неоднородных полях, в основном он характеризуется свечением вблизи острий и тонких проводов.

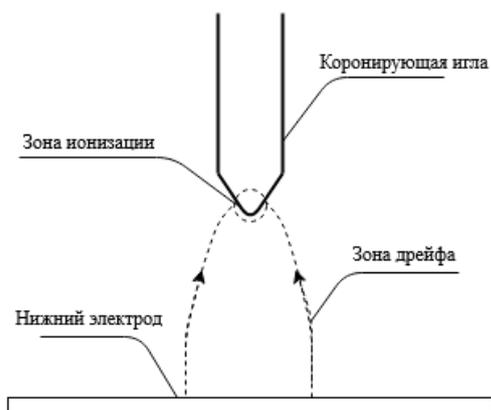


Рис.1. Схема коронного разряда

Коронный разряд (Рис.1) характеризуется наличием 2-ух зон [1]: собственно «зона ионизации» вблизи острия иглы, имеющая малый объем и высокую напряженность, и «зона дрейфа», в которой по сравнению с «ионизационным слоем» ионы только движутся по силовым линиям.

При отрицательном коронном разряде вблизи острия иглы за счет высокого градиента поля образуются свободные электроны, которые вследствие большей электроотрицательности кислорода присоединяются и образуют ионы кислорода. Это приводит к образованию потока ионов к заземленному электроду. Таким образом, поток ионов движется в пределах ограниченной области в виде «зонтика» от острия иглы к заземленному электроду. В случае попадания дисперсного вещества в поле коронного разряда происходит его зарядка и последующее осаждение за счет электростатических сил.

Особый интерес представляет изучение движения аэрозолей и способы их осаждения. Аэрозоли – суспензия твердых или жидких частиц в газе, чаще всего в воздухе [2]. Одной из практических задач является разработка эффективных пробоотборников для полидисперсных аэрозольных сред. Для этого необходимо уметь предсказывать поведение микрочастиц под влиянием разных факторов.

Цель работы: изучение динамики движения ионов и микроаэрозоля, зарядки и осаждения в электростатическом пробоотборнике с отрицательным коронным разрядом типа «игла-плоскость»

Задачи:

1. Провести оценочные расчеты заряда и поля иглы, скорости ионов и увлекаемых ими микрочастиц, объемного заряда, концентрации ионов.
2. Провести эксперимент по получению оксидного осадка от двух коронирующих игл и количественно подтвердить расчетными оценками влияние кулоновского отталкивания объемных зарядов «зонтиков»

3. Провести эксперимент по осаждению аэрозоля NaCl в макете электростатического пробоотборника и сравнить профиль осадка с теоретической оценкой.

## 2. Обозначения

$E$  – напряженность электрического поля

$U = 10^4$  В – подаваемое напряжение

$\lambda_1 = 8$  мм – расстояние от иглы до плоскости нижнего электрода

$r_{и} = 0,0825$  мм – радиус острия иглы

$\lambda$  – расстояние от плоскости нижнего электрода до эквипотенциали

$I = 10$  мкА – ток одной иголки

$Z = 1,4$  (см/с)/(В/см) = 420 см/с – подвижность ионов

$n$  – концентрация нейтральных молекул воздуха

$n_i$  – концентрация ионов в «зонтике»

$N_a = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>

$V_m = 22,4$  л/моль

$d$  – диаметр аэрозольной частицы

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость частицы

$\varepsilon_{NaCl} = 6,3$

$\xi$  – характерная постоянная аэрозольной частицы

$q_{п}$  – предельный заряд аэрозольной частицы

$t_0$  – характерный временной фактор зарядки частиц

$\mu = 1,86 \cdot 10^{-4}$  Пуаз – динамическая вязкость воздуха

$q$  – заряд иглы

$Q$  – объемный заряд

$H$  – средневзвешенное положение заряда иглы

$E_{п}$  – поле объемного заряда в точке пробного

$k = 9 \cdot 10^9$  Н\*м<sup>2</sup>/Кл<sup>2</sup> – кулоновский коэффициент

$S_1, S_2$  – площади зон коронного разряда

### 3. Теоретическая часть

#### 3.1. Поле и заряд иглы в модели гиперboloида

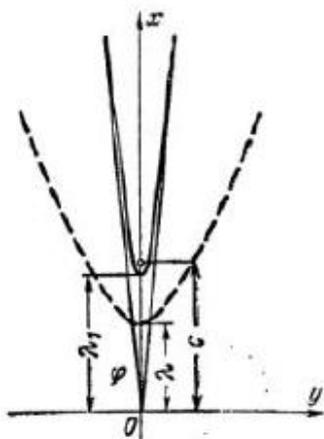


Рис 2. Система «игла-плоскость»

Рассмотрим иглу в качестве гиперboloида (Рис. 2), находящегося на расстоянии  $\lambda_1$  от плоскости заземленного электрода. Введем систему координат: ось  $x$  – ось симметрии гиперboloида, оси  $z$  и  $y$  лежат в плоскости пластины. Обозначим за  $\lambda$  расстояние от плоскости до эквипотенциальной поверхности,  $c = \lambda_1 + r_{и}$ , где  $r_{и}$  – радиус кривизны иглы. В этом случае эквипотенциальные поверхности и поверхность иглы описываются уравнением:

$$\frac{x^2}{\lambda^2} - \frac{y^2 + z^2}{c^2 - \lambda^2} = 1$$

Тогда поле иглы, представляемой в виде гиперboloида, описывается формулой [3, стр 29]:

$$E = \frac{2Uc}{\ln \frac{c + \lambda_1}{c - \lambda_1} \cdot \sqrt{\frac{x^2}{\lambda^4} + \frac{y^2 + z^2}{(c^2 - \lambda^2)^2}}} \cdot \frac{1}{\lambda(c^2 - \lambda^2)} \quad (1)$$

Сразу же оценим поле на расстоянии  $\lambda = \lambda_1/2$ .

$$\begin{aligned} E_0 &= \frac{2Uc}{\ln \left( \frac{r_{и} + 2\lambda_1}{r_{и}} \right)} \cdot \frac{1}{c^2 - \frac{\lambda_1^2}{4}} \\ &= \frac{2 * 10^4 \text{ В} * 8,0825 * 10^{-3} \text{ м}}{\ln \left( \frac{82,5 * 10^{-6} \text{ м} + 2 * 8 * 10^{-3} \text{ м}}{82,5 * 10^{-6} \text{ м}} \right) * \left( (8,0825 * 10^{-3} \text{ м})^2 - \frac{(8 * 10^{-3} \text{ м})^2}{4} \right)} \\ &= 6,21 * 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}} \end{aligned}$$

Зададимся вопросом о плотности распределения заряда на игле и собственно самой величиной заряда:  $\sigma = \frac{E}{4\pi}$ . Отсюда:

$$\sigma = \frac{Uc}{2\pi \ln \left( \frac{r_{и} + 2\lambda_1}{r_{и}} \right) \cdot \sqrt{\frac{x^2}{\lambda_1^4} + \frac{\frac{\lambda_1^2}{c^2} - 1}{\lambda_1^2}}} \cdot \frac{1}{\lambda_1(c^2 - \lambda_1^2)} \quad (2)$$

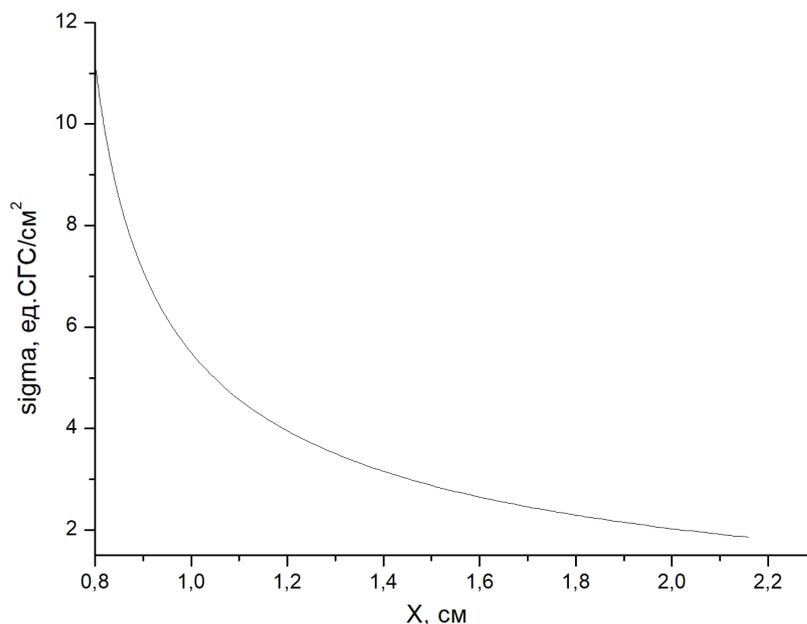


Рис 3. Зависимость поверхностной плотности от расстояния до поверхности нижнего электрода

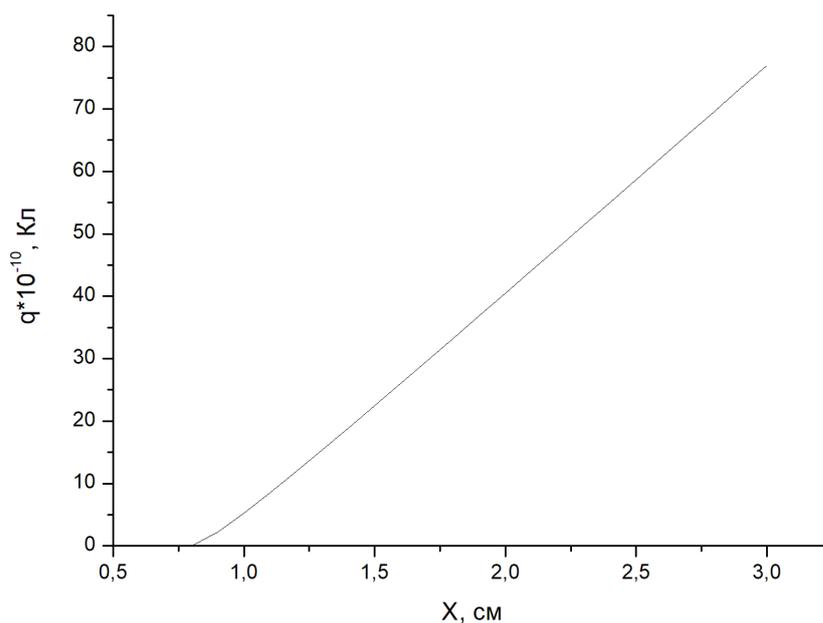


Рис 4. Зависимость частичного заряда иглы от расстояния до нижнего электрода

Из графика оценим средневзвешенное положение заряда на оси  $x$   $H = 2,5$  см.

Для вычисления заряда разобьем весь гиперboloид на кольца, имеющие элементарный заряд:

$$dq = \sigma dS = \frac{Uc}{\ln \frac{c + \lambda_1}{c - \lambda_1} \cdot \sqrt{\frac{x^2}{\lambda_1^4} + \frac{\frac{x^2}{\lambda_1^2} - 1}{c^2 - \lambda_1^2}}} \cdot \frac{1}{\lambda_1 \sqrt{c^2 - \lambda_1^2}} \sqrt{\frac{x^2}{\lambda_1^2} - 1} dx \quad (3)$$

$$q = \int_{0,8}^{2,8} \frac{65,4 \sqrt{\frac{x^2}{0,8^2} - 1}}{\sqrt{\frac{x^2}{0,8^2} + \frac{\frac{x^2}{0,8^2} - 1}{0,8825^2 - 0,8^2}}} dx = 20,9 \text{ ед. СГС} = 6,96 * 10^{-9} \text{ Кл}$$

### 3.2. Оценка скорости увлекаемых ионным ветром молекул воздуха

В рассматриваемой нами задаче на иглу подается напряжение  $U=10^4$  В, примем, что  $I = 10$  мкА и  $S = 1 \text{ см}^2$  - сечение пучка ионов на полувысоте «зонтика». Выделяемая при этом энергия расходуется на увеличение кинетической энергии ионов и молекул воздуха, опишем данное утверждение в виде уравнения баланса.

$$2UI = ntv^3S + n_i m v_i^3 S \quad (4)$$

Считаем, что  $m=m_i= 53,44 * 10^{-27}$  кг. Скорость ионов определяется формулой [2, с.149] и рассчитывается:

$$v_i = ZE_0 = 1,4 \frac{\text{см}^2}{\text{В} * \text{с}} * 6,21 * 10^3 \frac{\text{В}}{\text{см}} = 86,9 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

Оценим концентрации ионов и частиц в объеме:

$$n_0 = \frac{N_a}{V_m} = \frac{6,022 * 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{22,4 * 10^3 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}} = 2,68 * 10^{19} \frac{1}{\text{см}^3};$$

$$\begin{aligned} n_i &= \frac{I}{evS} = \frac{10^{-5} \text{ А}}{1,6 * 10^{-19} \text{ Кл} * 86,9 \frac{\text{М}}{\text{с}} * 10^{-4} \text{ м}^2} = 7,19 * 10^{15} \frac{1}{\text{м}^3} \\ &= 7,19 * 10^9 \frac{1}{\text{см}^3} \end{aligned}$$

В уравнении (4)  $m=m_i$  и  $S = \text{const}$  и соответственно  $nv^3 \gg n_i v_i^3$ , поскольку скорость нейтральных частиц не может превышать скорости ионов и  $\frac{n}{n_i} = 10^9$ ,

поэтому в уравнении баланса можно пренебречь членом, описывающим кинетическую энергию ионов.

Соответственно, получим:

$$v = \sqrt[3]{\frac{2UI}{nmS}} = \sqrt[3]{\frac{2 * 10^4 \text{В} * 10^{-5} \text{А}}{2,68 * 10^{25} \frac{1}{\text{М}^3} * 53,44 * 10^{-27} \text{кг} * 10^{-4} \text{см}^2}} = 11,17 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

### 3.3. Динамика зарядки частицы и предельный заряд аэрозольной частицы в электрическом поле

Предельный заряд частицы вычисляется по формуле [2, с. 149], где  $\xi = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon+2}$  – характерная постоянная:

$$q_{\text{п}} = \frac{\xi E_0 d^2}{4} \quad (5)$$

Для частицы размером  $d = 5 \text{ мкм}$   $\varepsilon=6,3$ , получим:

$$q_{\text{п}} = \frac{2,27 * 0,5 * 10^6 \frac{\text{В}}{\text{М}} * (5 * 10^{-4})^2 \text{см}^2}{4} * \frac{3,3 * 10^{-5}}{3 * 10^9} = 7,82 * 10^{-16} \text{Кл}$$

Найдем характерный временной фактор  $t_0$  зарядки частицы [2, с.150] и время зарядки до 90% предельного заряда:

$$t_0 = \frac{1}{\pi n_i e Z} = \frac{1}{3,14 * 420 \frac{\text{см}}{\text{с}} * 4,8 * 10^{-10} \text{СГСед. заряда} * 7,19 * 10^9 \frac{1}{\text{см}^3}} = 2 * 10^{-4} \text{с}$$

Отношение текущего заряда на аэрозольной частице  $n$  к предельному заряду  $n_s$  определяется формулой [2, 148]:

$$\frac{n}{n_s} = \frac{t}{t + t_0} \quad (6)$$

$$0,9 = \frac{t}{t + t_0} \Rightarrow t_3 = 9t_0 = 1,8 \text{ мс}$$

### 3.4. Движение заряженной частицы под действием поля в воздухе

Рассмотрим упрощенную задачу движения заряженной микрочастицы между обкладками плоского конденсатора. В этом случае движение будет описываться следующим уравнением, где  $F_{\text{эд}}$  – электростатическая сила и  $F_c$  – сила Стокса:

$$m \frac{dv}{dt} = F_{\text{эл}} - F_c \quad (7)$$

$$F_{\text{эл}} = 0,9q_n E_0; F_c = 3\pi\mu d v \quad (8)$$

Решим дифференциальное уравнение вида (9), где  $\tau = \frac{m}{3\pi\mu d}$  – время инерционной релаксации:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{v}{\tau} + \frac{0,9q_n E_0}{m} \quad (9)$$

$$v(t) = \frac{0,9q_n E_0 \tau}{m} \left( 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \right) \quad (10)$$

Интегрируя решение дифференциального уравнения, получаем функцию, описывающую расстояние, пройденное частицей, от времени:

$$S(t) = \frac{0,9q_n E_0 \tau}{m} \left( t + \tau \left( e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} - 1 \right) \right) \quad (11)$$

Уравнение решается графически и находится зависимость  $t_k(d)$ , где  $t_k$  удовлетворяет равенству  $S(t_k) = h$ :

$$\frac{mh}{0,9q_n E_0 \tau} = \left( t + \tau \left( e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} - 1 \right) \right) \quad (12)$$

Примем, что суммарное время жизни частицы  $t_k$  от попадания между пластинами конденсатора до соударения с нижней пластиной равняется сумме времени зарядки частицы до 0,9 от предельного заряда и времени движения частицы с постоянным зарядом 0,9 от максимального. Результат расчета  $t_k$  приведен на рис.5.

Из графика видно, что время жизни резко растет для частиц субмикронного размера, крупные частицы быстро осаждаются в начале пробоотборника.

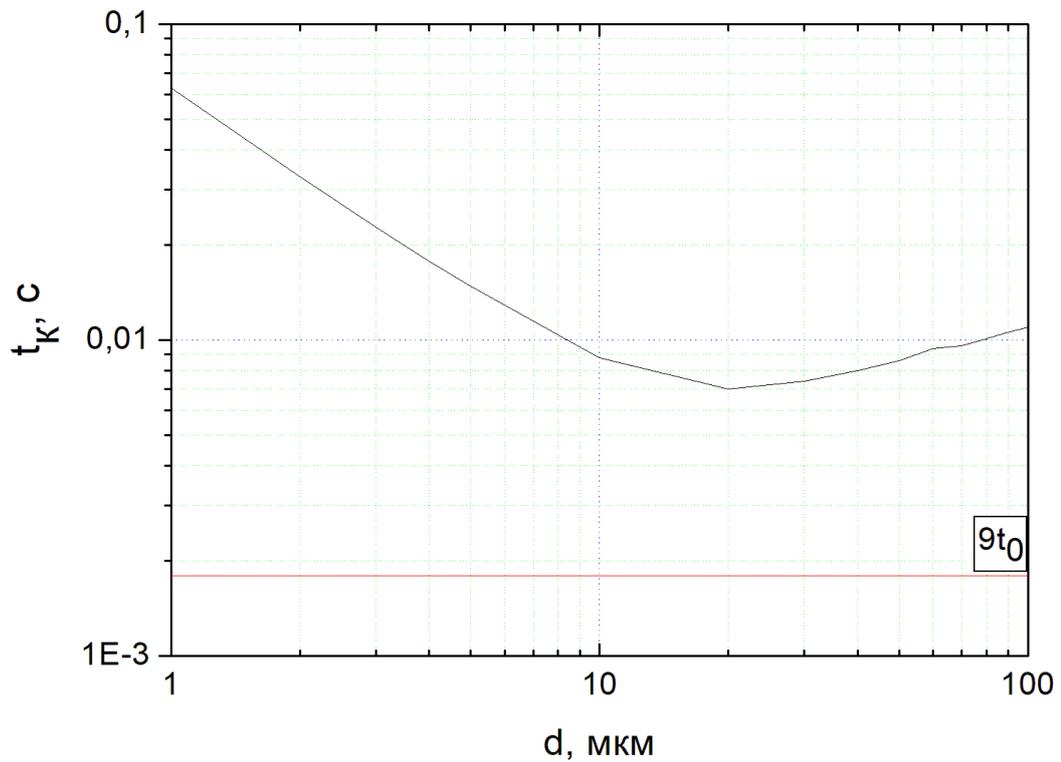


Рис. 5. Зависимость времени жизни  $t_k$  от диаметра аэрозольной частицы

#### 4. Экспериментальная часть

##### 4.1. Описание экспериментальной установки

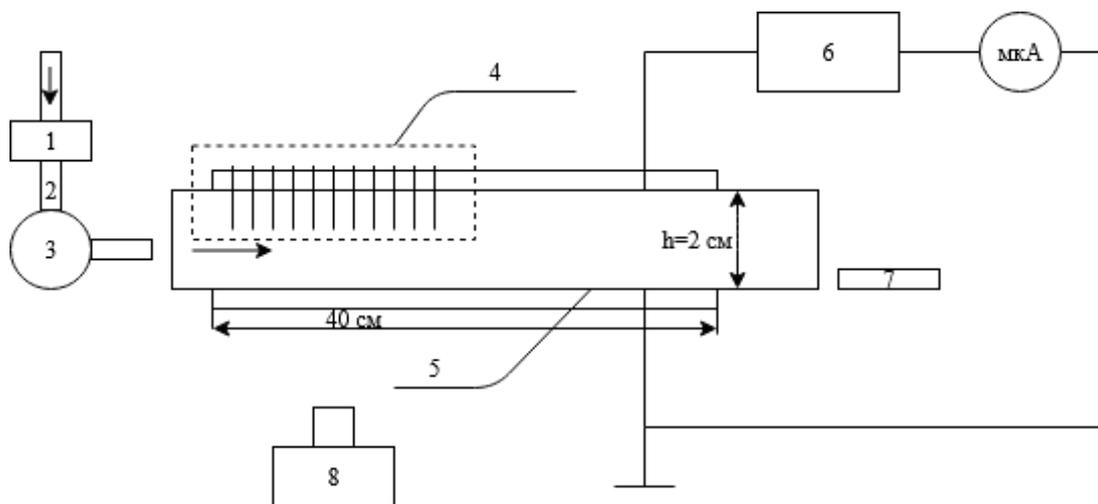


Рис.6. Схема установки

Установка состоит из: 1 - фильтра, 2 - расходомера, 3 - форсунки, 4 - коронирующих иголок, 5 - прямоугольного канала осадителя, 6 - блока питания на  $U = -10$  кВ, 7 - лазера, 8 - фотоаппарата для съемки осаждения, микроамперметра.

Электростатический осадитель (Рис. 6) представляет собой канал прямоугольного сечения, с прозрачными боковыми стенками из оргстекла для визуализации процессов, происходящих внутри. Горизонтальные стенки – это электроды с проводящим слоем из алюминиевой фольги, на верхнем располагается ряд коронирующих иголок с радиусом острия  $r_{и}= 82,5$  мкм.

Аэрозоль образуется внутри форсунки в виде микрокапель раствора NaCl в диапазоне размеров от 1 до 5 мкм. За счет быстрого высыхания в канал осадителя аэрозоль попадает в виде микрочастиц NaCl размером около 60% от исходного размера капель. Наличие диспергированного вещества в полости осадителя можно определить по рассеянию лазерного луча: при выключенном высоком напряжении поток аэрозоля однородный и распределен по всей длине осадителя, при включении установки иголки возникает коронный разряд, ощущается характерный запах озона и по мере движения аэрозоля в канале наблюдается ослабление яркости лазерного луча (Рис.7б).

#### **4.2. Осаждение аэрозоля в пробоотборнике**

Эксперимент связан с движением аэрозоля в пробоотборнике. В первом случае аэрозоль подается в полость осадителя без напряжения (Рис.7а). Рассеяние лазерного излучения на частицах однородно, поскольку никакому стороннему воздействию дисперсная фаза не подвергается. При включении напряжения (Рис.7б) наблюдается изменение яркости луча (Рис.7в) по длине канала, что связано с тем, что концентрация аэрозоля у конца ряда коронирующих иголок уменьшается из-за осаждения на заземленный электрод.

После проведения эксперимента было проведена фоторегистрация осадка (Рис. 7г) на нижнем электроде и путем сканирования получена кривая плотности осадка по длине канала (Рис. 7д).

Важным следствием является то, что оба метода показывают близкие результаты по форме кривых осаждения и основное осаждение происходит в области под иголками.

Из результатов измерения расхода объемная скорость откачки составила  $v_{об} = 250$  см<sup>3</sup>/с т.е. линейная скорость потока аэрозоля в канале составляет  $v_{от}=0,6$  м/с. Тогда расстояние, которое частицы размером 1-5 мкм пройдут внутри канала пробоотборника до осаждения находится в диапазоне от 0,9 см до 3,7 см (см. рис.5).

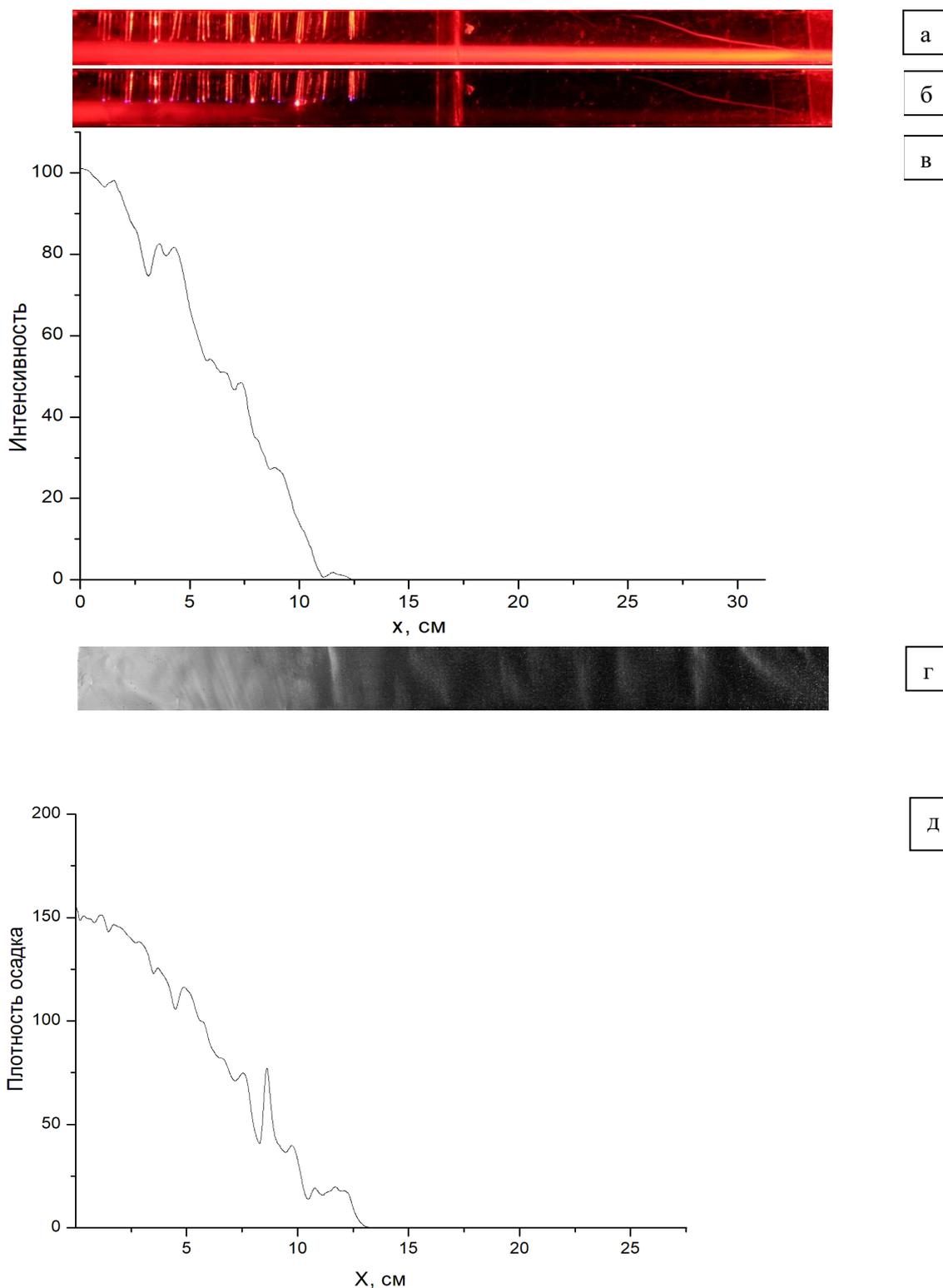


Рис. 7. Регистрация аэрозольных частиц по длине пробоотборника: а) при отсутствии напряжения в пробоотборнике б) при наличии напряжения в пробоотборнике; в) график зависимости интенсивности лазерного луча от координаты; г) фото осадка аэрозоля NaCl на поверхности нижнего электрода; д) график зависимости плотности осадка от координаты



Рис. 8. Явление пробоя в пробоотборнике при горении твердотопливного состава с  $AlB_{12}$

Дополнительный эксперимент (Рис.8) состоял в проверке действия пробоотборника на примере осаждения дыма от горения твердого топлива, включающего  $AlB_{12}$  (эквивалентная химическая формула). При горении в зоне пламени (2500-3000 К) наблюдалось зеленое свечение с образованием грубодисперсной фазы. Ожидаемое осаждение по типу аэрозоля  $NaCl$  не произошло, поскольку наблюдались микропробои в газе между остриями игл и заземленным электродом в виде стримеров (Рис.8). Они вызваны высокой концентрацией ионизированных продуктов горения.

В предыдущих опытах [4] с данным пробоотборником была получена картина пятен осадка при отсутствии аэрозоля (Рис. 9). Поэтому представляет интерес рассмотрение процесса взаимодействия «зонтиков» при близком расположении иглонок друг к другу.

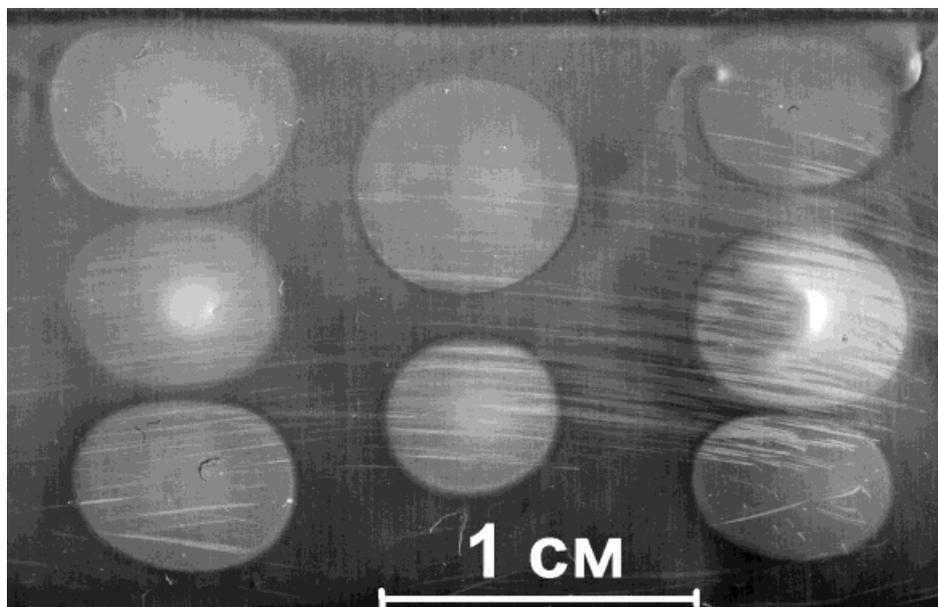


Рис. 9. Белые пятна на фольге заземленного электрода

### 4.3. Анализ пятен горения разряда

Известно, что в ходе эксперимента в зоне ионизации образуются и впоследствии двигаются к противоположному электроду ионы, на пути они сталкиваются и «прилипают» к молекулам кислорода в составе воздуха, таким образом заряжая их. В конечном итоге данные кислородные ионы взаимодействуют с алюминием в составе фольги нижнего электрода и образуют белые оксидные пятна (Рис.10). При рассмотрении картины пятен от двух иголок, расположенных на расстоянии 3 мм друг от друга, заметны четкие границы в промежутке между ними и размытые в отдалении. Кроме того, наблюдается увеличение расстояния между пятнами, что предположительно вызвано электростатическим отталкиванием «зонтиков».

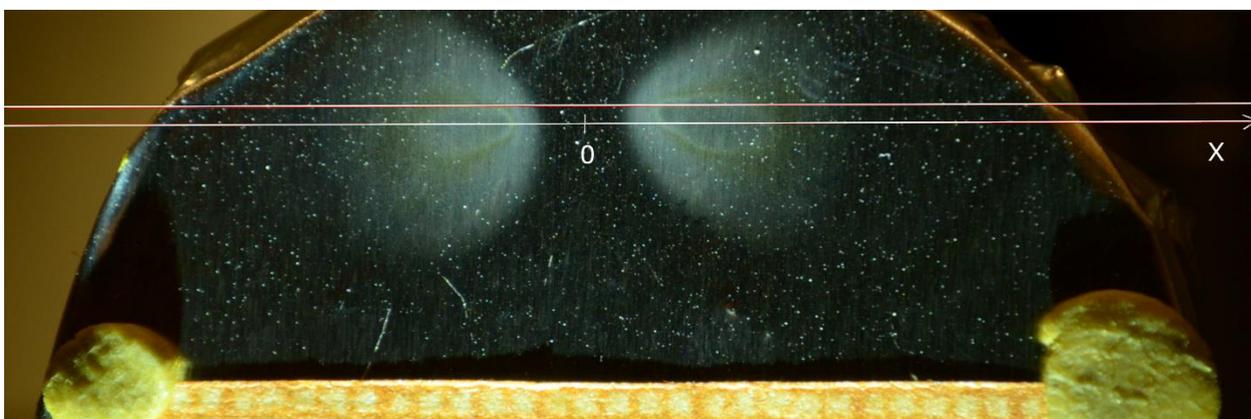


Рис.10. Оксидные пятна от двух коронирующих иголок  $h = 8$  мм,  $\Delta l = 3$  мм – расстояние между остриями игл

Последующая фотометрия (Рис.11) показывает зависимость интенсивности осадка от координаты  $X$  соответствующей полосе, отмеченной на Рис. 10. Из анализа графика были найдены средневзвешенные координаты центров обоих пятен  $X_1 = -4,32$  мм,  $X_2 = 3,69$  мм. Таким образом, среднее расстояние отклонения ионов от вертикали при попадании на подложку можно оценить как  $(3,69 + 4,32 - 3) / 2$  мм = 2,55 мм.

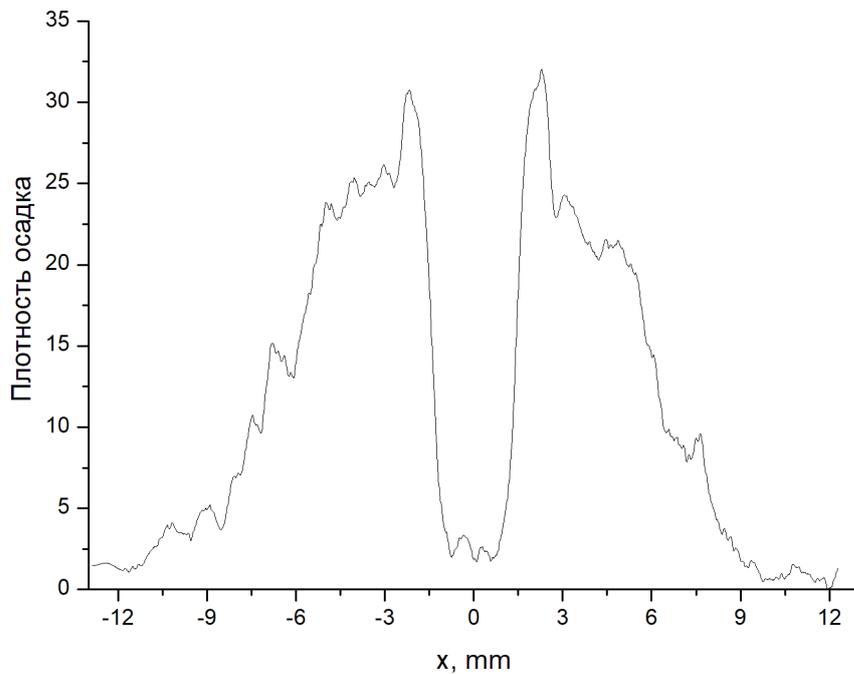


Рис. 11. Зависимость плотности осадка пятен от координаты X (Рис.10)

Проведем оценку отклонения пробного иона, вызванного отталкиванием объемным зарядом соседней иголки. Будем рассматривать процесс на полувывоте, т.е.  $\lambda = \lambda_1/2$ . Примем, что расстояние между центром объемного заряда и пробным ионом из «зонтика» второй иголки равно  $r_{\text{п}} = (2,55+3)$  мм = 5,55 мм. Считая объемный заряд  $Q$  точечным и расположенным на расстоянии  $\lambda = \lambda_1/2$  от плоскости нижнего электрода, найдем его значение и поле в области пробного иона:

$$Q = enS \frac{\lambda_1}{2} = 1,6 * 10^{-19} \text{ Кл} * 7,19 * 10^{15} \frac{1}{\text{М}^3} * 10^{-4} \text{ М}^2 * 0,4 * 10^{-2} \text{ М} \\ = 4,6 * 10^{-10} \text{ Кл}$$

$$E_{\text{п}} = \frac{kQ}{r_{\text{п}}^2} = \frac{9 * 10^9 \frac{\text{НМ}^2}{\text{Кл}^2} * 4,6 * 10^{-10} \text{ Кл}}{(5,55 * 10^{-3} \text{ М})^2} = 1,34 * 10^5 \frac{\text{В}}{\text{М}}$$

Используя формулу для подвижности из раздела 3.2, найдем поперечную скорость:

$$v_{\text{п}} = ZE_{\text{п}} = 1,4 \frac{\text{см}^2}{\text{В} * \text{с}} * 1,34 * 10^3 \frac{\text{В}}{\text{см}} = 18,76 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

Поскольку время жизни иона равно  $t_n = \frac{8 \cdot 10^{-3} \text{ М}}{86,9 \frac{\text{М}}{\text{с}}} \approx 10^{-4} \text{ с}$ , то конечное смещение иона от оси иглы на нижнем электроде будет равно  $l_{\text{п}} = 10^{-4} \text{ с} * 18,76 \text{ м/с} = 1,9 \text{ мм}$ .

Получено хорошее совпадение теоретической оценки экспериментальным результатом, т.е. «отталкивание зонтиков» обусловлено кулоновским взаимодействием объемных зарядов.

#### 4.4. Определение зоны коронного разряда

Геометрическая форма иглки представляет собой комбинацию шара, конуса и цилиндра. Сама ионизация происходит в зоне, очерчиваемой малым радиусом кривизны и стыком с конусно-цилиндрической частью иглы (Рис.12). Образуется так называемый «чехол короны» [1].

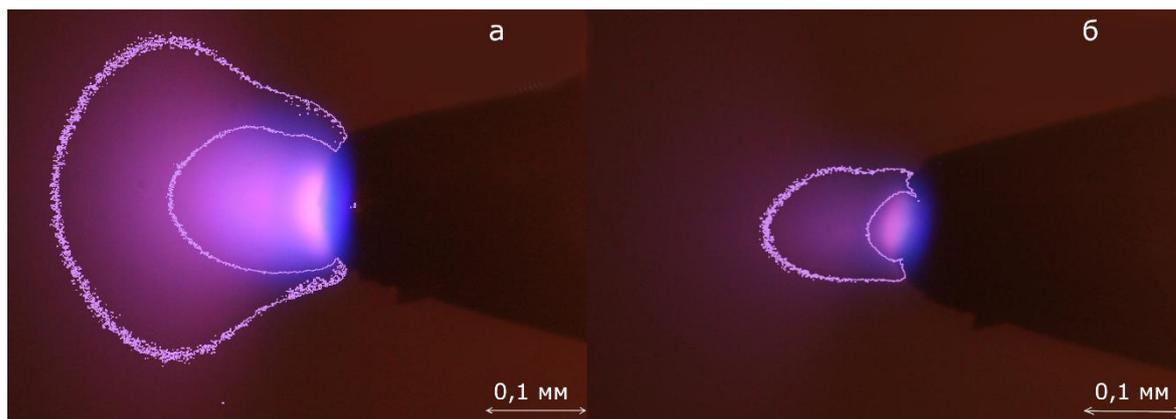


Рис. 12. Свечение коронного разряда на игле при разных расстояниях от противоположного электрода: а)  $\lambda_1 = 7$  мм,  $I = 54$  мкА, б)  $\lambda_1 = 12$  мм,  $I = 14,5$  мкА

В таблице 1 приведены результаты измерения тока иглки и площади зоны ионизации в зависимости от расстояния  $\lambda_1$ . Зоны ионизации получены обработкой снимков с построением эквиденсит при двух фиксированных уровнях яркости. Далее рассчитаны площади  $S_1$  и  $S_2$  и объемы этих зон.

Таблица 1. Характеристики конфигурации зоны ионизации

$\lambda_1$ , мм	$I$ , мкА	$S_1^{3/2} * 10^{-9}$ , см <sup>3</sup>	$S_2^{3/2} * 10^{-9}$ , см <sup>3</sup>
6	78	590	401
7	54	538	276
8	38	338	208
10	22,5	156	51
12	14,5	78	6
15	9	40	5

Используя таблицу 1, построены графики зависимости тока и объема зон ионизации в зависимости от расстояния до заземленного электрода. На графиках видна хорошая корреляция между током и объемом. Т.е. это позволяет производить настройку токов иглонок в пробоотборнике по яркости свечения зон ионизации.

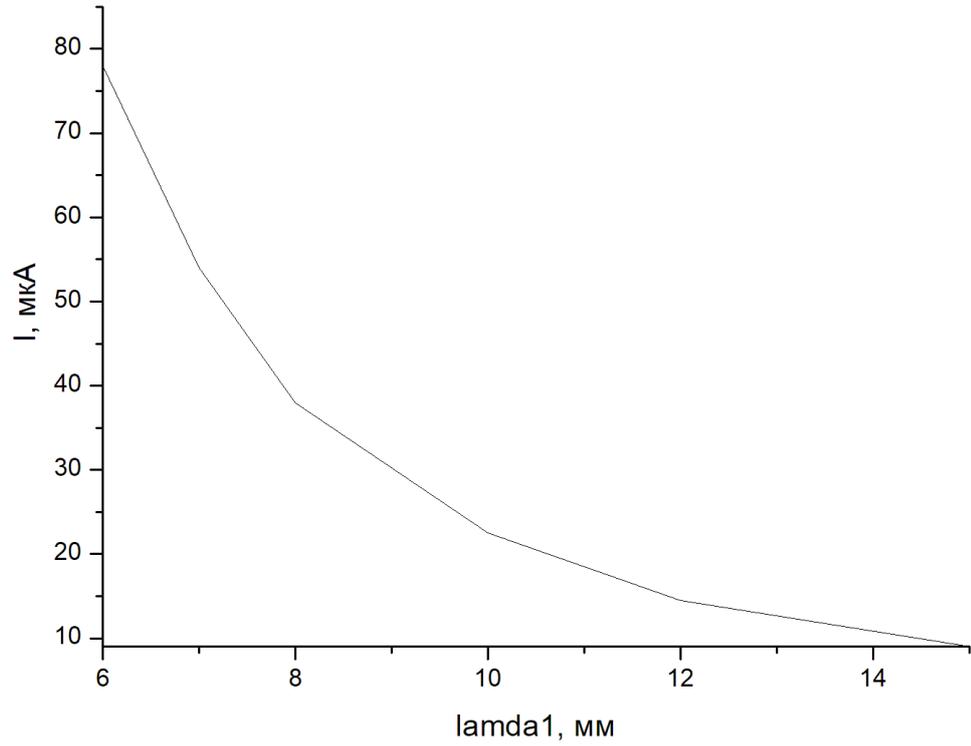


Рис. 13. Зависимость тока от расстояния до нижнего электрода

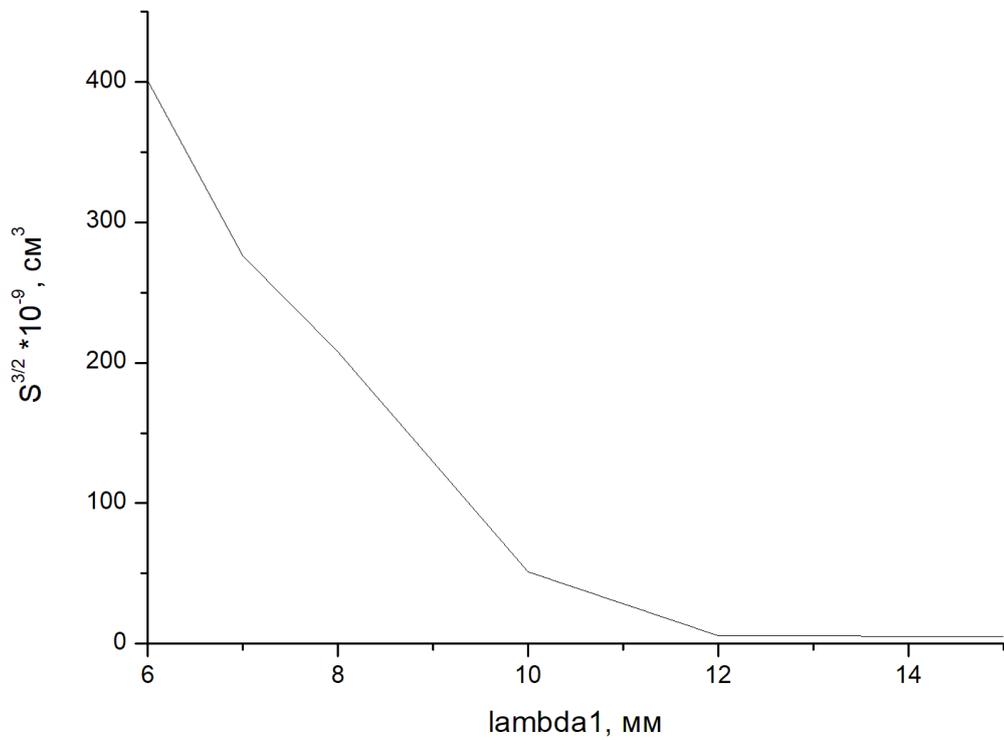


Рис. 14. Зависимость объема области ионизации до нижнего электрода

## 5. Выводы и заключение

В работе проведены измерения параметров движения микрочастиц в поле коронного разряда. В результате теоретических оценок получены:

1) значения заряда  $q \approx 7 \cdot 10^{-9}$  Кл и поля иглы на расстоянии 4 мм от поверхности заземленного электрода  $E_0 \approx 6,2 \cdot 10^5$  В/м в модели гиперболоида, распределение заряда по длине иглы;

2) скорость ионов и потока молекул воздуха, увлекаемых ими (ионного ветра), которые составили  $v_i \approx 87 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и  $v \approx 11 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;

3) концентрация ионов  $n_i \approx 7 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{см}^3}$  и объемный заряд  $Q = 4,6 \cdot 10^{-10}$  Кл, который оказался на порядок меньше заряда иглы

4) время зарядки частиц, которое существенно меньше времени движения аэрозольных частиц в пробоотборнике

5) предельные заряды аэрозольных частиц

Проведен эксперимент по зарядке и осаждению микрочастиц NaCl из аэрозольного потока в поле отрицательного коронного разряда (-10 кВ) с помощью пробоотборника с 28 иглами. Оценочный расчет длины осаждения аэрозоля в канале пробоотборника согласуется с продольным профилем интенсивности рассеивания лазерного луча и плотностью осаждения аэрозоля по длине канала.

Эксперимент с регистрацией пятен оксидного осадка от двух близкорасположенных игл показал искажение форм пятен и их раздвижку, что обусловлено «отталкиванием зонтиков» за счет кулоновского взаимодействия одноименных объемных зарядов. Величина среднего отклонения ионов в «зонтиках» соответствует расчетной оценке.

Получены микрофотографии зоны ионизации, прилегающей к острию иглы в зависимости от расстояния до заземленного электрода. Построен график объема зоны ионизации как функции расстояния до заземленного электрода. Данный график хорошо коррелирует с соответствующей кривой тока через иглу. Этот практический результат позволяет регулировать ток иголок в пробоотборнике по яркости свечения зон ионизации.

### Список литературы

1. Ю.К. Стишков, А.В. Самусенко, И.А. Ашихмин. Коронный разряд и электрогазодинамические течения в воздухе //Журнал «Успехи физических наук», 2018. 1331–1345 стр.
2. П. Райст. «Аэрозоли. Введение в теорию». Перевод с английского под редакцией д-ра хим. наук Б. Ф. Садовского. Москва «Мир», 1987. 277 стр.

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

4. Решетников И. В. «Динамика движения заряженных аэрозольных частиц в электростатическом поле»