

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Зиренко Тарас Андреевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование распределения электростатического поля при ряде
конфигураций коронного разряда типа игла-плоскость**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20304

Научный руководитель:

к. ф. - м.н. В.В. Карасёв

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. В.В.Максимов

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к. т. н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование характеристик коронного разряда в системе типа игла-плоскость с вариацией геометрических параметров игл, их пространственного расположения, напряжений коронного разряда. Изучены детали процесса коронного разряда для геометрии: одиночная игла - плоскость игла и линейного ряда из пяти иголок. Регистрируемыми величинами были вольт-амперные зависимости и параметры пятен (размер, форма, фотометрическая плотность) наноксидного алюминия, образующихся в результате взаимодействия ионов кислорода с алюминиевым противоэлектродом.

Из опытов в системе игла-плоскость обнаружено, что ионный ток не зависит от остроты иглы и уменьшается при увеличении расстояния между кончиком иглы и заземленной плоскостью. Так же было обнаружено, что плотность пятна увеличивается при увеличении напряжения коронного разряда.

В опытах с линейным рядом из пяти иголок выявлено, что по мере приближения игл друг к другу в результате кулоновского отталкивания ионных потоков происходит соответствующая деформация формы зоны дрейфа. Так же установлено что, при близком расположении игл существенно ухудшается эффективность генерации ионов из чехла коронного разряда каждой иглы.

Оглавление.

Аннотация	2
1. Введение.....	3
2. Обозначение величин и их числовые значения	4
3. Теоретическая часть.....	4
3.1 Оценка поле создаваемое иглой в модели шарика.....	5
3.2 Оценка поля, создаваемого плоскостью.....	5
3.3 Оценка поля, создаваемого объёмным зарядом	5
3.4 Сравнение магнитной силы с силой Кулона со стороны объёмного заряда на ион	6
3.5 Распределение заряда на заземленном электроде	7
3.6 Оценка скорости ионного ветер	8
4. Схема установки.....	8
5. Результаты и их обсуждения.....	9
5.1 Результаты для катода, состоящего из одной иглы	9
5.2 Результаты для катода, состоящего из 5 иголок.....	14
6. Выводы	15
7. Список литературы	16

1. Введение

Коронный разряд - самостоятельный разряд в газе в неоднородном электрическом поле [1, стр. 1331]. Самостоятельным является разряд, который продолжается после отключения внешних источников ионизации.

Различают коронные разряды положительной и отрицательной полярности. В отрицательной короне электроны воспроизводятся посредством вторичной ион - электронной эмиссии: положительный ион, попадая на поверхность катода, с некоторой вероятностью выбьет электрон, который запустит новую лавину. В положительной - вторичные электроны появляются путём фотоионизации, за счёт фотонов, исходящих из чехла коронного разряда. В данной работе используется отрицательный коронный разряд, так как положительный разряд неустойчив и имеет большую вероятность появления стримеров.

Характерными областями коронного разряда являются область ионизации (чехол короны) и область дрейфа [1, стр. 1331]. Первая область занимает небольшой объём, в котором происходят ионизационные процессы, в этом объёме имеет место высокая напряженность поля. В области дрейфа, куда большей области, происходит движение ионов и электронов вдоль силовых линий. Заряженные частицы в этой зоне не рождаются из-за недостаточной напряженности поля. Снижение напряженности в зоне дрейфа обусловлено сильным влиянием объёмного заряда, который имеет такую же полярность, как и катод. В электроотрицательных газах (к которым относится кислород) наблюдается процесс прилипания - электроны присоединяются к молекулам и тем самым образуют отрицательные ионы. Из-за процесса прилипания в области дрейфа количество электронов стремительно уменьшается.

Классическая система для наблюдения коронного разряда состоит из двух электродов, один из которых имеет маленький радиус кривизны по сравнению с другим, такой электрод называется "коронирующим" или "активным", а второй - "противоэлектродом" [1, стр. 1332]. В данной работе рассматривается система игла-плоскость.

Целью данной работы являлось изучение характеристик коронного разряда в системе типа игла-плоскость с вариацией геометрических характеристик игл, их пространственного расположения, напряжений. Изучить детали процесса коронного разряда для конфигурации - одиночная игла и линейного ряда из пяти иголок.

2.Обозначение величин и их числовые значения

$U = 10000 \text{ В} = 33 \text{ СВ}$ – подаваемое напряжение

$r_{\text{и}} = 0,05 \text{ мм}$ – радиус острия иглы

$l_0 = 1,7 \text{ мм}$ – длина острия иглы

$r_{\text{ц}} = 0,35 \text{ мм}$ – радиус цилиндрической части

$h = 10 \text{ мм}$ – расстояние от иглы до пластины (высота)

$I = 30 \text{ мкА}$ – ток между иглой и подложкой с фольгой

$n_{\text{в}} = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ – концентрация воздуха при нормальных условиях

$\mu_{\text{в}} = 29 \text{ г/моль}$ – молярная масса воздуха

$N_{\text{А}} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ – число Авогадро

$e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ - заряд электрона

$R = 12 \text{ мм}$ – радиус сечения, через которое протекает ток

$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – диэлектрическая постоянная

3.Теоретическая часть.

Верхний электрод представляет собой плоскость, из которой выпирают иголки Рис.1., сама плоскость покрыта алюминиевой фольгой, поэтому между иголок имеется заряд, который также оказывает влияние на движение ионов. Тогда вклад в движение иона от верхнего электрода состоит из поля, создаваемого иголкой, и поля заряженной плоскости.

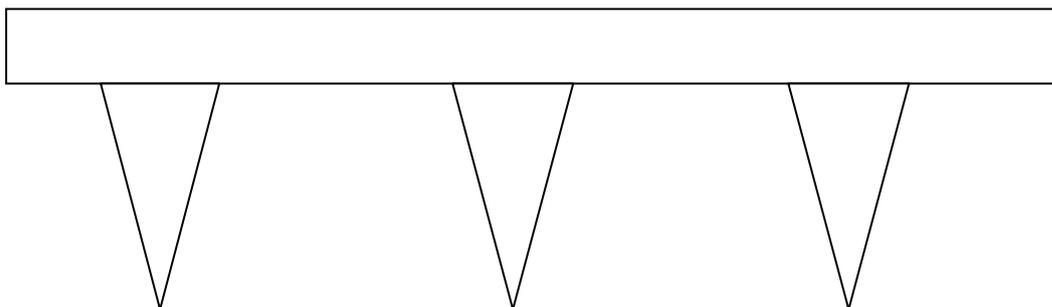


Рис.1. Примерный вид верхнего электрода

3.1. Оценка поля, создаваемого иглой в модели шарика.

Оценю поле создаваемое острием иглы. Остриё иглы представляет собой конус, положим этот конус шариком равного объёма. Радиус такого шара будет равен

$$V_{\text{шар}} = V_{\text{конус}} \rightarrow \frac{4}{3} \pi r_{\text{ш}}^3 = \frac{1}{3} \pi r_{\text{к}}^2 l \rightarrow r_{\text{ш}} = \frac{\sqrt[3]{r_{\text{к}}^2 l}}{4} = \frac{\sqrt[3]{(0,35 \text{ мм})^2 \cdot 1,7 \text{ мм}}}{4} \approx 0,037 \text{ см},$$

а заряд этого шара

$$q_{\text{ш}} = U r_{\text{ш}} \rightarrow q_{\text{ш}} = 33 \text{ СВ} \cdot 0,037 \text{ см} \approx 1,2 \text{ СГСЭ} \approx 4 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$$

, тогда поле создаваемое таким шариком.

$$\bar{E} = \frac{q_{\text{ш}}}{r^2} \cdot \frac{\bar{r}}{r} \quad (1)$$

Где r - расстояние от центра шара до иона.

3.2. Оценка поля, создаваемого плоскостью.

Плоскость верхнего электрода создаёт однородное поле, которое определяется напряжением, подаваемым на верхний электрод- U , и расстоянием между электродами- h .

$$E = \frac{U}{h} \rightarrow E = \frac{10^4 \text{ В}}{0,01 \text{ м}} = 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 33 \frac{\text{ед.СГСЭ}}{\text{см}} \quad (2)$$

Также можно оценить заряд на верхней пластине, зная поверхностную плотность заряда на этой плоскости - σ и площадь фольги вокруг иголки - S

$$\sigma = \epsilon_0 E = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^6 = 8,85 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

$$S = \pi R^2 = 3,14 \cdot (12 \cdot 10^{-3})^2 = 4,52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$q = \sigma S = 8,85 \cdot 10^{-6} \cdot 4,52 \cdot 10^{-4} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} = 12 \text{ ед. СГСЭ}$$

3.3. Оценка поля, создаваемого объёмным зарядом.

В пространстве между электродами возникает объёмный заряд, который обусловлен течением постоянного ионного тока между электродами, форма этого заряда точно не определена, но для оценок приму её цилиндрической. Тогда поле создаваемое этим зарядом при $r > R$:

$$\bar{E} = 2\pi\rho \frac{R^2}{r} \cdot \frac{\bar{r}}{r}$$

А для $r < R$:

$$\vec{E} = 2\pi\rho \cdot \vec{r}$$

Где R - радиус сечения цилиндра, ρ - плотность заряда, \vec{r} - расстояние от центра цилиндра до иона.

$$\rho = en = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,96 \cdot 10^{15} = 4,74 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3} = 1,4 \frac{\text{ед.СГСЭ}}{\text{см}^3}$$

а полный заряд определяется формулой:

$$q = \rho S h = 1,4 \cdot 4,52 \cdot 1 = 6,33 \text{ ед. СГСЭ}$$

Концентрацию ионов- n можно найти используя формулы:

$$j = nev_d \text{ и } j = \frac{I}{S}$$

Где v_d -скорость дрейфа = ZE (Z - подвижность ионов) [2, стр. 149], I - ионный ток, S - площадь сечения цилиндра.

$$S = \pi R^2 = 3,14 \cdot (12 \cdot 10^{-3})^2 = 4,52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 4,52 \text{ см}^2$$

$$n = \frac{I}{ev_d S} = \frac{30 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,4 \cdot 4,52 \cdot 10^{-4}} = 2,96 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3} = 2,96 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3} (3)$$

Тогда электрическое поле:

$$E = 2\pi\rho \frac{R^2}{r} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,4 \cdot 1,2^2}{2,5} = 5,06 \frac{\text{ед.СГСЭ}}{\text{см}}$$

3.4.Сравнение магнитной силы с силой Кулона со стороны объёмного заряда на ион.

Ионный ток между электродами создает магнитное поле, которое действует на ион противоположно электрическим силам.

Магнитное поле создаваемое ионным током рассчитывается по формуле:

$$H = \frac{2I}{cr}$$

Где c - скорость света, r - расстояние от центра цилиндра до иона.

Сила, с которой магнитное поле действует на ион, выражается формулой:

$$F_m = \frac{qv_d H}{c}$$

А со электрического поля:

$$F_e = qE$$

Тогда можно выразить отношения этих сил:

$$\frac{F_e}{F_m} = \frac{Ec^2r}{v_d 2I}$$

$$\frac{F_e}{F_m} = \frac{5 \cdot 9 \cdot 10^{20} \cdot 2,5}{1,4 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 10^5} \approx 5 \cdot 10^{11}$$

Отсюда можно сделать вывод, что магнитная составляющая сил, действующих на ион мала по сравнению с электрической, так что ей можно пренебречь.

3.5. Распределение заряда на заземленном электроде.

Коронирующий электрод индуцирует на заземленном электроде заряд, распределенный с поверхностной плотностью σ' . Если оценить иглу шаром равного объема, то

$$\sigma' = \frac{2hq_{ш}}{4\pi(x^2+h^2)^{\frac{3}{2}}} \quad [3, \text{стр } 46]$$

где x - расстояние на плоскости, отсчитываемое от центра проекции шарика на заземленный электрод.

Полученная зависимость имеет вид представленный на Рис.3.

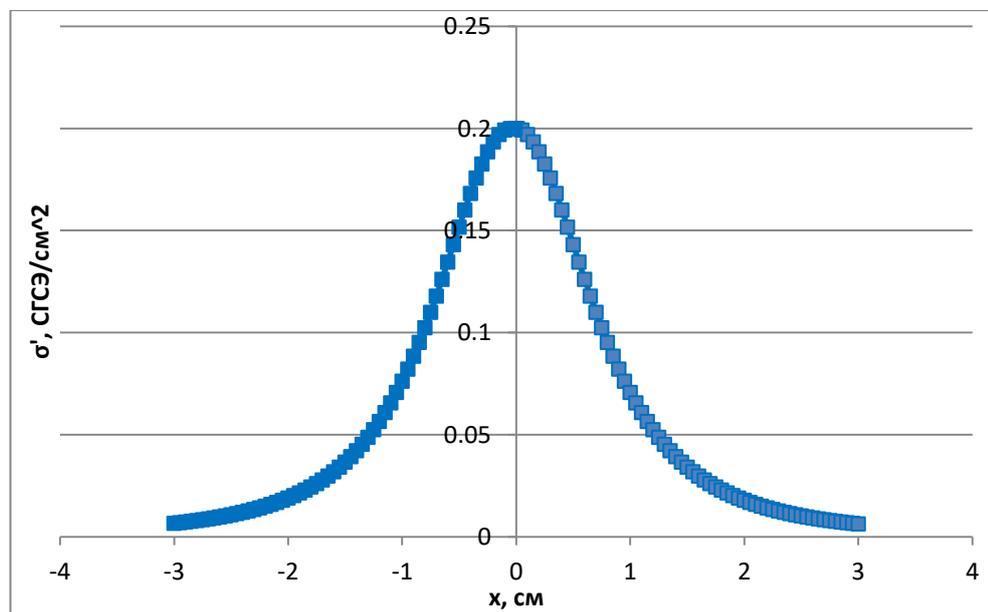


Рис.2. Распределение поверхностного заряда- σ' на заземленном электроде от расстояние на плоскости, отсчитываемое от центра проекции шарика на заземленный электрод- x .

3.6. Оценка скорости ионного ветер.

При протекании тока от одного электрода к другому вырабатывается энергия

$$A = IUt = \frac{IUh}{v_d}$$

для оценки можно считать что вся энергия расходуется на кинетическую энергию ионов и молекул воздуха. Тогда из закона сохранения энергии можно определить скорость молекул воздуха:

$$\frac{IUh}{v_d} = \frac{m_u v_d^2}{2} \cdot n_u V + \frac{m_g v_g^2}{2} \cdot n_g V$$

Считаю, что $m_u = m_g = \mu_B / N_A$, $V = \pi R^2 h$ - объём, через который протекает ток. n_u определяется из формулы (2) $= 2,96 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$, а $n_g = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Так как концентрация ионов гораздо меньше концентрации молекул воздуха то членом с n_u можно пренебречь. Тогда:

$$v_g \approx \sqrt{2 \frac{IUN_A}{v_d n_u S \mu_B}} \rightarrow v_g \approx \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4 \cdot 30 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{23}}{140 \cdot 2,7 \cdot 10^{25} \cdot 4,52 \cdot 10^{-4} \cdot 29 \cdot 10^{-3}}} \approx 2,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

4.Схема установки.

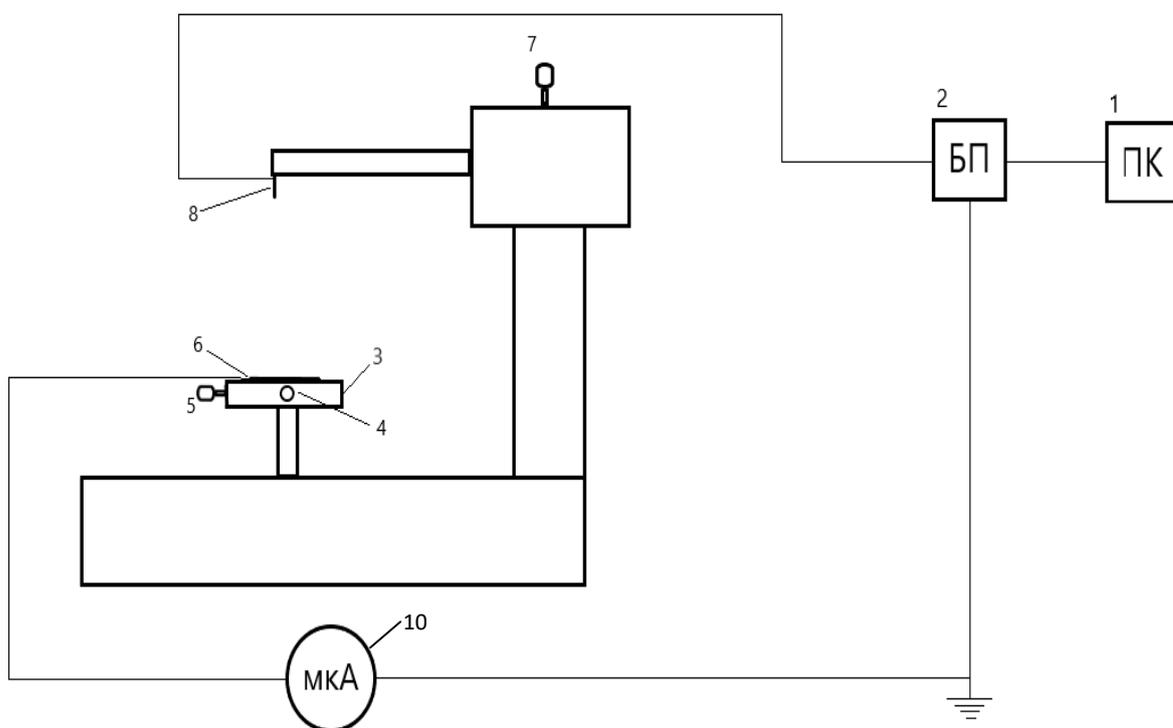


Рис.3. Схема установки

На Рис. 3. представлена схема экспериментальной установки, которая состоит из зафиксированной горизонтальной подставки 3, которая

обеспечивает движение в горизонтальной плоскости посредством вращения винтов 4 и 5 соответственно вперед - назад, вправо - влево. На этой подставке закреплена подложка с нанесенной на неё алюминиевой фольгой, к которой присоединен провод, идущий к микроамперметру 10, с помощью которого можно определить ток с погрешностью $\pm 2\text{мкА}$.

На высоте h закреплён на Г-образной подставке верхний электрод 8. Г-образная подставка, за счёт винта 7, обеспечивает движение по вертикали. На винт 7 нанесена шкала, которая позволяет измерять расстояния с точностью $\pm 5\text{мкм}$. На верхний электрод подаётся напряжение с высоковольтного источника питания 2, который управляется персональным компьютером 1.

Верхний электрод 8 использовался в двух конфигурациях:

1. одиночная игла. Игла выпирает на 5мм
2. пять коронирующих игл, расположенные в ряд, расстояние между иглами составляет $3,3\pm 0,1\text{мм}$. Каждая игла выпирает на 4 мм

5. Результаты и их обсуждения.

5.1. Результаты для катода, состоящего из одной иглы.

Были проведены опыты с вариацией радиуса кривизны кончика иглы. Для этого были отсканированы более 20 иголок, представленные на Рис.4., из которых были отобраны две, кончики которых представлены на Рис.5. соответствующие радиусы сферических кончиков равны $35 \pm 5\text{мкм}$ и $75 \pm 5\text{мкм}$. Эти две иглы, использованы в эксперименте в соответствии с блок-схемой Рис.3.

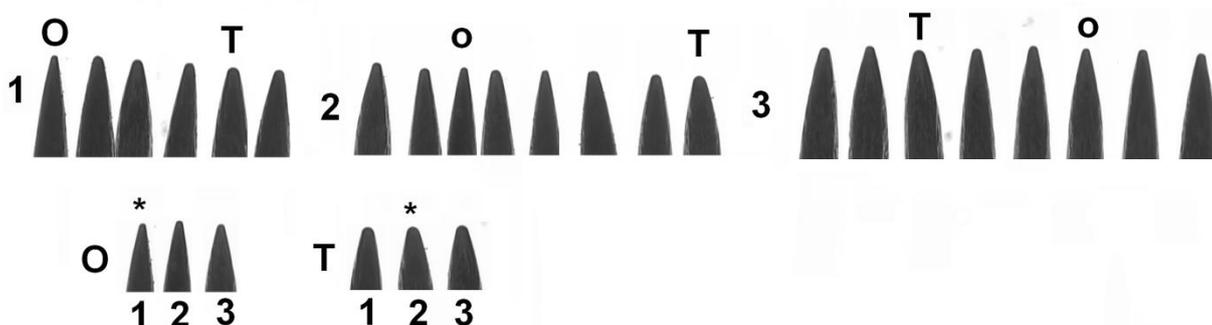


Рис.4. Сканы наборов иголок, из которых находились острая (O) и тупая (T) иголки.

*-выбранные иглы.

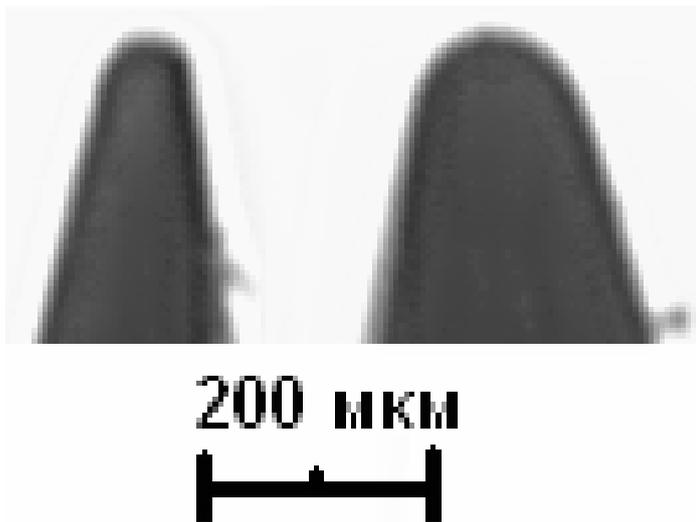


Рис.5. кончики тупой и острой иглы.

Были измерены ВАХ для тупой и острой иглы при вариации расстояния между кончиком иглы и противоэлектродом в диапазоне 12-25мм, соответствующие графики приведены на Рис.6., Рис.7.

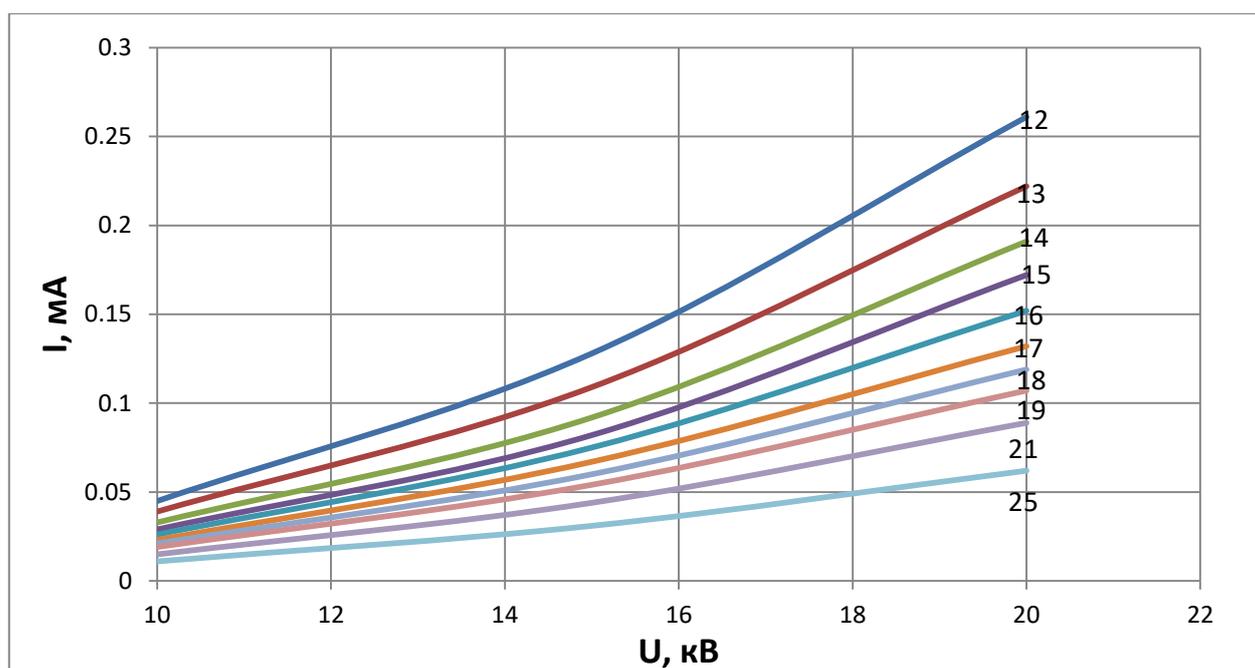


Рис.6. Семейство ВАХ тупой иглы при различных расстояния от кончика иглы до противоелектрода .

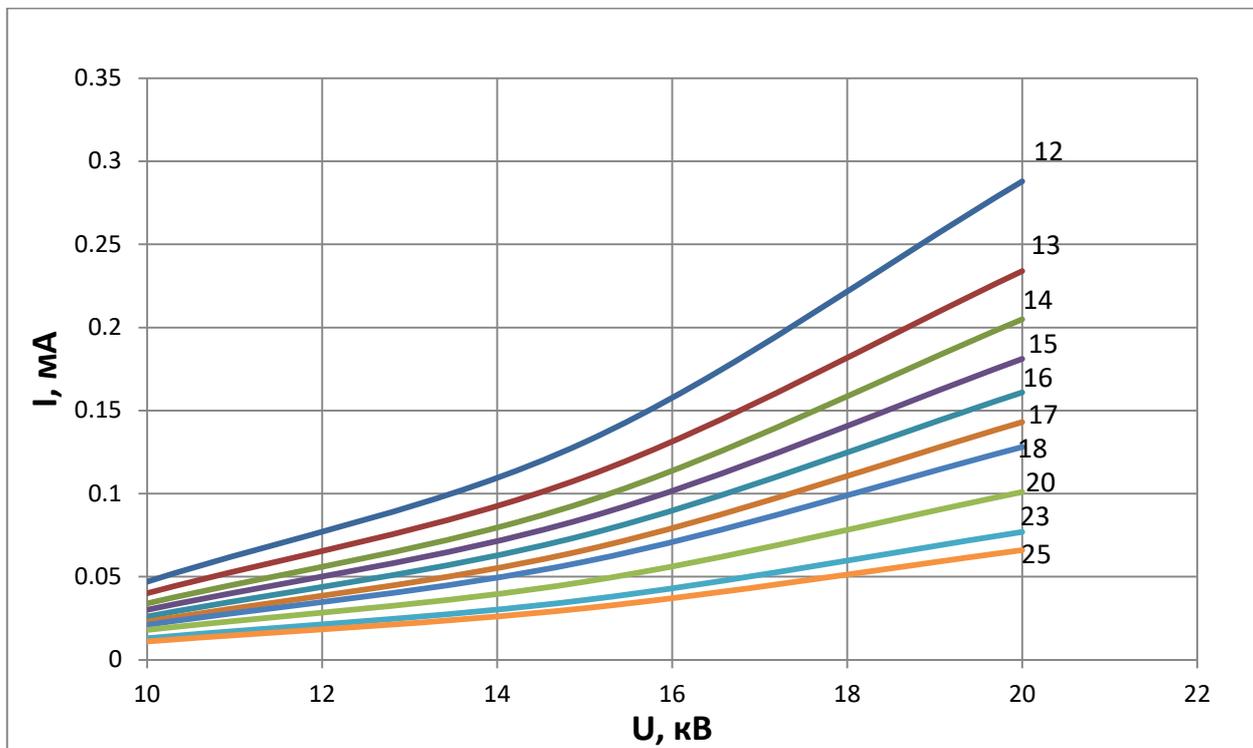


Рис.7. Семейство ВАХ острой иглы при различных расстояния от кончика иглы до противоилектрода. I- ток, U- напряжение

На Рис.8. приведены кривые зависимостей ток от расстоянии от кончика иглы до противоилектрода для трёх значений напряжения 10, 15, 20 кВ

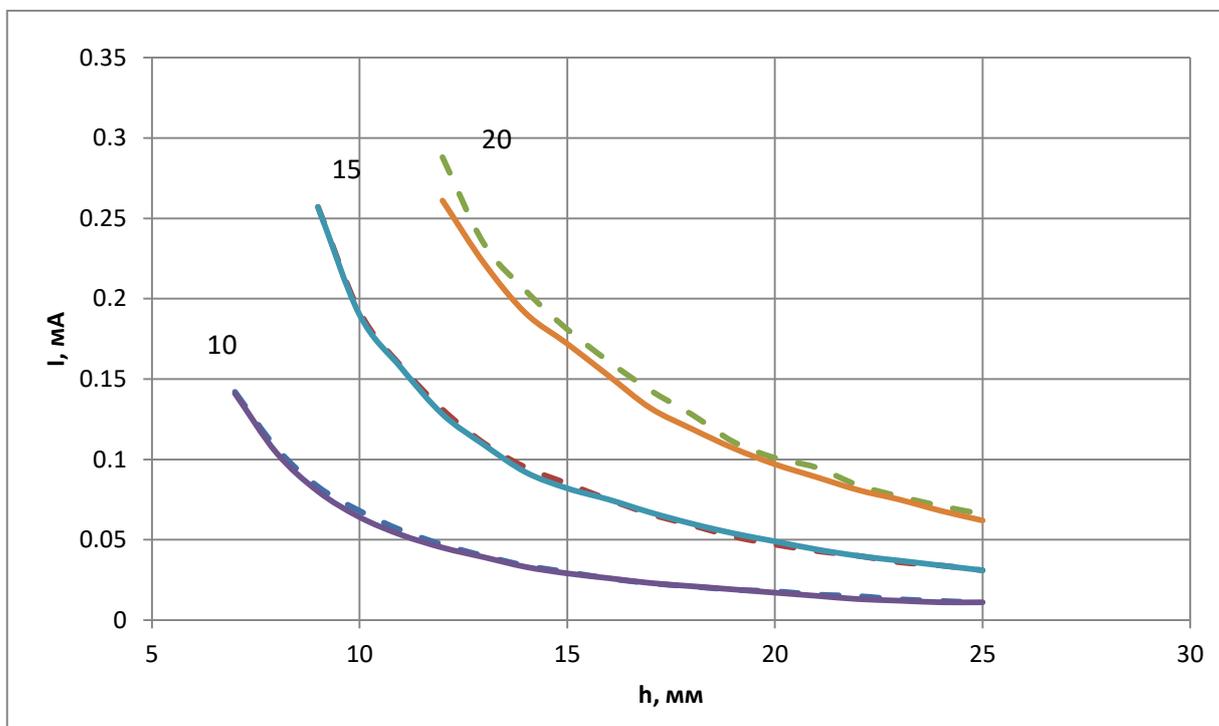


Рис.8. Зависимость тока- I от расстояния от кончика иглы- h до противоилектрода. Сплошная кривая- тупая игла, штриховая- острая игла.

Все кривые являются монотонно убывающими и, как следует из графика, соответствующие пары для тупой и острой иглы практически совпадают, то есть ионный ток практически не зависит от остроты иглы.

При протекании тока коронного разряда в воздухе на противоэлектроре из алюминиевой фольги образуется белое пятно. Предположительно это пятно состоит из нанослоя оксида алюминия, который образуется при взаимодействии ионов кислорода с алюминием подложки.

На Рис.9. приведены сканы осадков от тупой и острой иглы, полученные при высоте $h = 15$ мм и трёх значениях напряжения коронного разряда. Для тупой иглы в нижней части рисунка приведен график фотометрирования трёх пятен примерно вдоль диаметров.

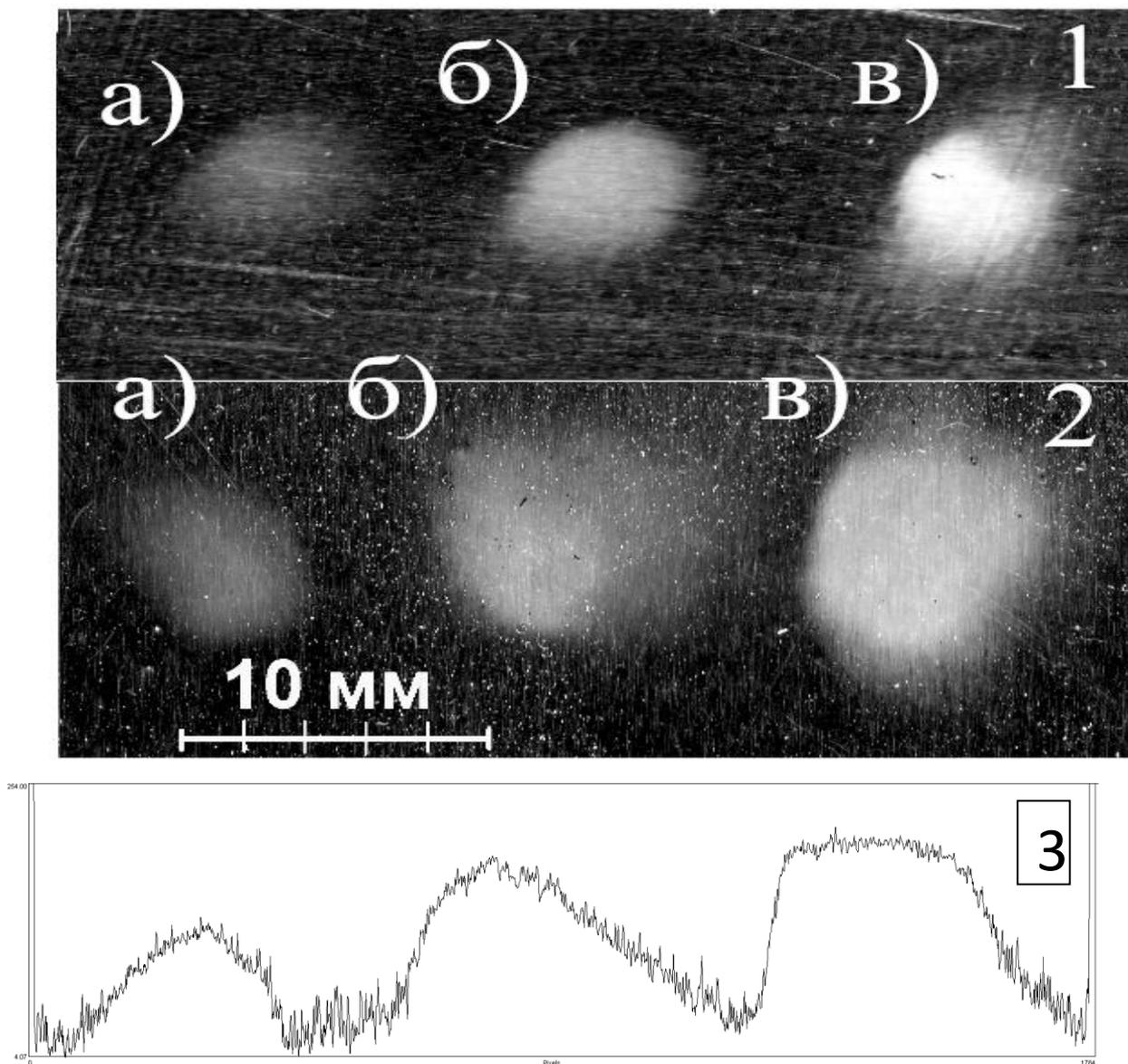


Рис.9. Осадок, образовавшийся на противоэлектроре. Расстояние от кончика иглы до противоэлектрора 15мм. 1)От острой иголки, время накопления осадка 10 мин. 2)От тупой иголки, время накопления 5 мин. 3) Сканирование 3-х пятен осадка приведенных на фото2 а) при 10 кВ. б) при 15 кВ. в) при 20 кВ

В целом можно сказать, что размер и форма пятна растёт с увеличением напряжения и соответственно тока разряда. То есть эти пятна являются полуколичественной характеристикой величины тока разряда. Как видим диаметры этих пятен не превышает одного сантиметра. в курсовой работе 2019 года [4, стр. 16] проведены похожие опыты с коронным разрядом в системе игла- плоскость из которых следует, что размер токового пятна был 28мм (при высоте h равной 9 мм). Логично предположить, что токовое пятно существенно шире. Вероятно это связано с тем, что в реакцию вступают

ионы из центральной части ионного потока, обладающие достаточно большой скоростью.

5.2. Результаты для катода, состоящего из 5 иглонок.

Следующая пара опытов была проведена с пятью коронирующими иглами, расположенными в ряд на одной высоте, при расстоянии между соседними иглами 3,3 мм. В первом опыте иглы были закреплены на диэлектрическом держаке, во втором опыте к этой конфигурации был добавлен верхний плоский электрод, из которого иглы выступали на 4 мм.

На Рис.10. приведена ВАХ для обоих случаев.

Из сравнения данных приведенных на Рис.10. и Рис.7. в случае набора из 5 игл средний ток с одной иглы уменьшился в 3,5 раза. Из этого следует, что при близком расположении игл ухудшается эффективность генерации ионов из чехла коронного разряда.

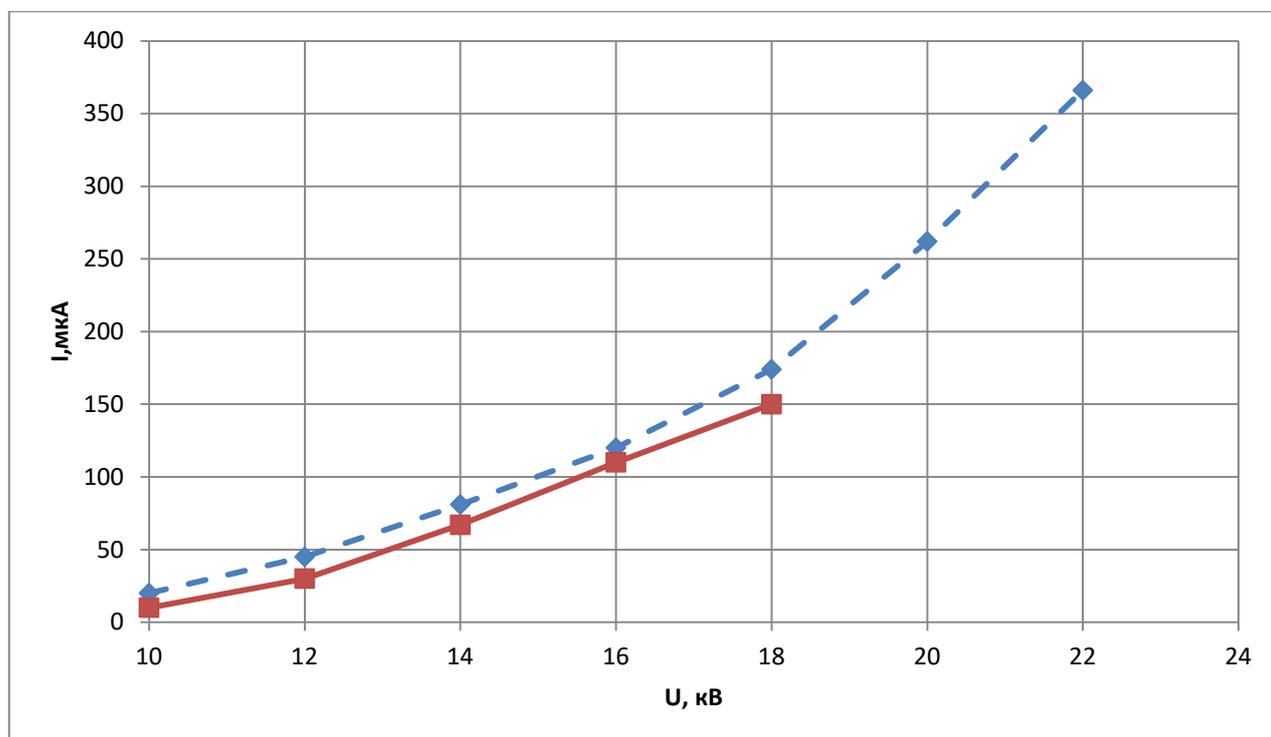


Рис.10. ВАХ. Расстояние от кончика иглы до противоиэлектрода 15мм. Сплошная кривая- с проводящей верхней плоскостью, штрихованная- без проводящей верхней плоскости.

На Рис.11. приведены соответствующие сканы совокупностей осадков ЭТИХ ИГОЛОК

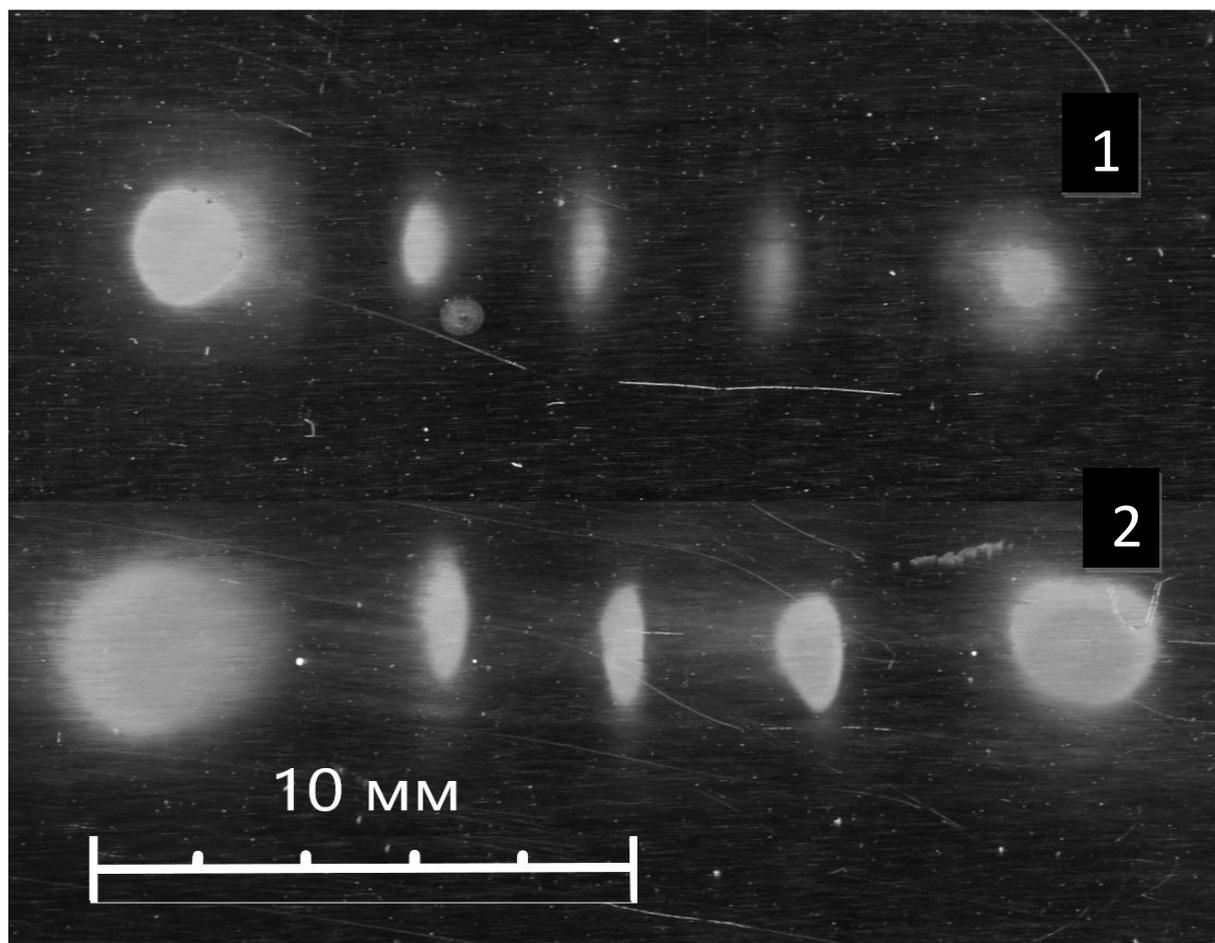


Рис.11. Осадок, образовавшийся на противоэлектрде. Расстояние от кончика иглы до противоэлектрда 15мм. 1) С проводящей верхней плоскостью при напряжении 18 кВ за время 24 минуты. 2) Без проводящей верхней плоскости при напряжении 20 кВ за время 12 минуты

Из вида пятен осадка следует, что происходит кулоновское отталкивание одноименных объёмных зарядов, что приводит к “сплющиванию” трёх внутренних пятен, и так же за счёт этого происходит “раздвижка” крайних пятен. Причём эффект действия большого заряд (2) на верхнем электроде состоит в том, что раздвижка крайних пятен становится меньше.

6.Вывод

Было установлено, что:

1. ионный ток не зависит от остроты иглы.
2. ионный ток уменьшается при увеличении высоты h

3. яркость пятен увеличивается при увеличении напряжения.
4. по мере приближения игл друг к другу возникает кулоновское отталкивание ионных потоков (зоны дрейфа) с соответствующей деформацией зонтика.
5. при близком расположении игл ухудшается эффективность генерации ионов из чехла коронного разряда

7.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.
3. В. И. Яковлев. «Классическая электродинамика. Часть 1. Электричество и магнетизм». Москва–Ижевск, 2016.
4. Н. Соколов. Курсовая работа "Движение ионов и микрочастиц в неоднородном электрическом поле". Новосибирск, 2019