

Исследование движения и зарядки микрочастиц в поле коронного разряда

Затолоцкая Юлия Андреевна

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 18352, 3 семестр, 2019 год.

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. **Карасев Владимир Васильевич**

Аннотация

Целью работы являлось изучение эффективности зарядки и осаждения микрочастиц в отрицательном коронном разряде типа игла – плоскость с потенциалом -10 кВ. Задачи работы: нахождение пространственных распределений тока ионов, оценка зарядов в системе, исследование динамики движения и зарядки микрочастиц в отрицательном коронном разряде, нахождение длин осаждения микрочастиц в электростатическом пробоеотборнике. Сделаны оценки и расчеты по скоростям движения ионов и молекул воздуха, зарядов на электродах и объемного заряда ионов. Рассчитано время зарядки и предельный заряд микрочастиц, приобретаемый в ионном потоке. Проведены эксперименты по измерению плотности тока и параметров пятна продуктов химической реакции ионов с плоским электродом из алюминия. На установке, включающей макет электростатического пробоеотборника частиц, проведены эксперименты по зарядке и осаждению микрочастиц бромида калия (KBr) в коронном разряде с 20 иглами. Экспериментальная длина осаждения составляет 2–3 см и соответствует рассчитанной теоретически.

Ключевые слова: коронный разряд, ионизация, электростатическое поле, микрочастицы, игла.

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Затолоцкая Юлия Андреевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование движения и зарядки микрочастиц в поле коронного
разряда**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18352

Научный руководитель:

Карасев В. В., к. ф.-м. н.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 2019 г.

Преподаватель практикума

Костюрина А.Г

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 2019 г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

к.т.н. Астрелин В.Т.

«_____» _____ 2019 г.

Новосибирск, 2019

1. Аннотация

Целью работы являлось изучение эффективности зарядки и осаждения микрочастиц в отрицательном коронном разряде типа игла – плоскость с потенциалом -10 кВ.

Задачи работы: нахождение пространственных распределений тока ионов, оценка зарядов в системе, исследование динамики движения и зарядки микрочастиц в отрицательном коронном разряде, нахождение длин осаждения микрочастиц в электростатическом пробоотборнике.

Сделаны оценки и расчеты по скоростям движения ионов и молекул воздуха, зарядов на электродах и объемного заряда ионов. Рассчитано время зарядки и предельный заряд микрочастиц, приобретаемый в ионном потоке.

Проведены эксперименты по измерению плотности тока и параметров пятна продуктов химической реакции ионов с плоским электродом из алюминия. На установке, включающей макет электростатического пробоотборника частиц, проведены эксперименты по зарядке и осаждению микрочастиц бромида калия (KBr) в коронном разряде с 20 иглами. Экспериментальная длина осаждения составляет 2 – 3 см и соответствует рассчитанной теоретически.

Ключевые слова: коронный разряд, ионизация, электростатическое поле, микрочастицы, игла.

Оглавление

1.	Введение	3
2.	Основные обозначения.....	4
3.	Расчеты и численные оценки.....	5
3.1.	Расчет поправки Каннингема	5
3.2.	Продольная составляющая скорости ионов	5
3.3.	Размер иона в расчетах.....	6
3.4.	Поперечная составляющая скорости ионов.....	6
3.5.	Расчет зарядов	7
3.6.	Расчет сил	10
3.7.	Расчет энергий в коронном разряде	10
3.8.	Предельный заряд микрочастицы	11
3.9.	Уравнение движения микрочастицы.....	12
3.10.	Длины осаждения микрочастиц	13
4.	Экспериментальная часть	13
4.1.	Измерение тока на пластинах.....	13
4.2.	Исследование пятен на фольге при коронном разряде	14
4.3.	Осаждение микрочастиц в поле коронного разряда	18
5.	Выводы и заключения	20
6.	Литература	21

1. Введение

Для исследования основных параметров микрочастиц (размер, концентрация) применяются методы электронной и оптической микроскопии, для которых необходимо первоначально осадить микрочастицы на подложку. Основными методами осаждения являются седиментация, зарядка и осаждение в электростатическом поле. В курсовой работе сделан акцент на использовании коронного разряда для зарядки микрочастиц в газовом потоке и на последующем осаждении.

Коронный разряд – самостоятельный разряд в газе в неоднородном электрическом поле. При этом в промежутке между электродами наблюдаются две области с различными свойствами. Ионизационные процессы идут в чехле короны (ионизационном слое) – области с небольшим объемом, где имеет место достаточно высокая напряженность электрического поля. Остальная часть объема занята зоной дрейфа, где напряженность поля недостаточно высока для ионизации и размножение заряженных частиц не происходит, они просто дрейфуют вдоль силовых линий электрического поля. Установить границу между чехлом короны и внешней зоной можно по свечению. Если коронирующий электрод имеет положительную полярность, то во внешней зоне движутся положительные ионы, если отрицательная – отрицательные ионы и электроны. Так как воздух содержит электроотрицательные молекулы, то в нем активно происходит присоединение электрона к молекуле с образованием отрицательного иона, из-за чего концентрация электронов быстро уменьшается по мере удаления от ионизационного слоя. В системе игла – плоскость игла является коронирующим электродом, а плоскость – противоэлектродом. В работе используется отрицательная корона, так как в приложении к осаждению микрочастиц она является наиболее стабильной.

Коронный разряд относится к классу самостоятельных процессов, то есть для его поддержания не требуется постоянного действия внешнего источника ионизации. В отрицательном коронном разряде воспроизводство электронов обеспечивается вторичной ион-электронной эмиссией: положительный ион, попадая на поверхность катода, с некоторой вероятностью выбивает электрон, который и становится началом очередной лавины.

Для осаждения поток микрочастиц подается в конденсатор с отрицательным коронным разрядом. Отрицательные ионы, попадая на микрочастицы, заряжают их; частицы начинают движение по силовым линиям и осаждаются на заземленный плоский электрод.

Задачи работы: нахождение пространственных распределений тока ионов и напряженности электрического поля, оценка зарядов в системе, исследование динамики движения и зарядки микрочастиц, нахождение длин осаждения микрочастиц.

2. Основные обозначения

$e = 4,8 * 10^{-10}$ СГС = $1,602 * 10^{-19}$ Кл – заряд электрона [2].

$\mu_{\text{в}} = 1,86 * 10^{-5}$ Па * с = $1,86 * 10^{-4}$ Пуаз – вязкость воздуха.

$d_{\text{O}_2} = 3,4 * 10^{-10}$ м – диаметр молекулы кислорода [1, стр. 45].

$\lambda_{\text{O}_2} = 0,071 * 10^{-6}$ м – средняя длина свободного пробега молекулы кислорода [1, стр. 46].

$Z_{\text{O}_2} = 672$ (см/с)/ (ед. СГСЭ/см) = $2,24$ (см/с)/ (В/см) – среднее значение подвижности отрицательных ионов [3, стр. 48].

$\epsilon_0 = 8,85 * 10^{-12}$ Ф/м – абсолютная диэлектрическая проницаемость.

$\epsilon_{\text{в}} \approx 1$ – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха [4].

$m_{\text{O}_2} = 5,3 * 10^{-26}$ кг – масса иона кислорода.

$\rho_{\text{KBr}} = 2,74$ – плотность кристаллов KBr г/см³ [7].

3. Расчеты и численные оценки

3.1 Расчет поправки Каннингема

Первичными ионами, образующимися в коронном разряде, являются O_2^- и O^- [5, стр. 144]. Для того чтобы рассчитать силу сопротивления для ионов, необходимо учесть, что, когда диаметр частицы очень мал и близок к средней длине свободного пробега молекул среды, сила сопротивления Стокса становится в C_c раз меньше [1, стр. 61]. Это связано с тем, что для больших частиц основным источником сопротивления является вязкость среды, тогда как для маленьких частиц преобладающим механизмом сопротивления уже не может служить вязкость среды вследствие роли инерции молекул газа при столкновении их с частицами. Поправка Каннингема C_c равна [1, стр. 61] для ионов O_2^- :

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda_{O_2}}{d_{O_2}} \left[A + Q \exp \left(-\frac{bd_{O_2}}{2\lambda_{O_2}} \right) \right], \quad (1)$$

где $A = 1,257$; $Q = 0,4$; $b = 1,1$ – константы.

$$C_c = 1 + \frac{2 * 0,071 * 10^{-6}}{3,4 * 10^{-10}} \left[1,257 + Q \exp \left(-\frac{1,1 * 3,4 * 10^{-10}}{2 * 0,071 * 10^{-6}} \right) \right] = 692,6.$$

3.2 Продольная составляющая скорости ионов

Электрическое поле, создаваемое системой игла – плоскость, для оценки продольной составляющей скорости ионов примем постоянным и равным $E = 10^6$ В/м.

Уравнение движения для ионов O_2^- :

$$m_{O_2} a = eE - \frac{3\pi\mu_B v_{||} d_{O_2}}{C_c}, \quad (2)$$

где a – ускорение иона, $v_{||}$ – продольная скорость иона.

Из уравнения (2) получаем выражение для продольной составляющей скорости ионов O_2^- :

$$v_{||}(t) = \frac{eE\tau}{m_{O_2}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (3)$$

где

$$\tau = \frac{m_{O_2} C_c}{3\pi\mu_B d_{O_2}} = \frac{5,3 \cdot 10^{-26} \cdot 692,6}{3 \cdot 3,14 \cdot 1,86 \cdot 10^{-5} \cdot 3,4 \cdot 10^{-10}} = 2,14 \cdot 10^{-13} \text{ сек.} \quad (4)$$

Характерное время τ – бесконечно мало, поэтому в любой точке зоны дрейфа скорость иона является установившейся и пропорциональной напряженности E в этой точке.

Установившаяся продольная составляющая скорости ионов O_2^- :

$$v_{||} = \frac{eEC_c}{3\pi\mu_B d_{O_2}} = \frac{4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 10^6 \cdot 692,6}{3 \cdot 3,14 \cdot 1,86 \cdot 10^{-5} \cdot 3,4 \cdot 10^{-10}} = 1861,689 \text{ м/с.} \quad (5)$$

3.3 Размер иона в расчетах

Ионы O_2^- обладают зарядом, равным заряду электрона, и создают электрическое поле. Нейтральные молекулы воздуха поляризуются в этом электрическом поле, что приводит к кулоновскому взаимодействию с ионом, то есть сила сопротивления для ионов становится больше. Этот эффект можно учесть, если увеличить эквивалентный диаметр иона d в уравнении (2).

Возьмем известную величину подвижности ионов кислорода Z_{O_2} и рассчитаем продольную скорость иона O_2^- при $E = 10^6$ В/м:

$$v_{||} = Z_{O_2} E = 2,24 \cdot 10000 = 22400 \frac{\text{см}}{\text{с}} = 224 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (6)$$

Данная скорость оказалась меньше рассчитанной в предыдущем пункте (3.2), следовательно, основной диаметр иона нельзя использовать в расчётах скорости. Введем коррекцию на диаметр иона: при $d_{O_2} = 9,8 \cdot 10^{-8}$ см, скорость, рассчитанная по формуле (5), совпадает с рассчитанной по формуле (6), следовательно, этот диаметр является эффективным диаметром ионов O_2^- .

3.4 Поперечная составляющая скорости ионов

Ион взаимодействует с объемным зарядом, находящимся от него на расстоянии $r = 5$ мм. Если он взаимодействует кулоновски с объемным зарядом (пункт 3.5), представленным как точечный, то напряженность поля равна:

$$E = \frac{e^2 n V}{r},$$

где $n = \frac{I}{e Z_{O_2} E \langle S_{п.и.} \rangle} = 2,98 * 10^{10}$ ионов/см³ ($I = 51$ мкА, $\langle S_{п.и.} \rangle = 226$ мм²) – концентрация ионов во внешней зоне, $V = \frac{S_{п.и.} * h}{3} = \frac{4,52 * 0,8}{3} = 1,2$ см³ – объём зоны ионизации, где $S_{п.и.} = 452$ мм² (из пункта 4.1), $h = 8$ мм.

Исходя из результатов пункта 5.3 и формулы (5) поперечная составляющая скорости для данного поля равна:

$$v = \frac{e^2 n V C_c}{r 3 \pi \mu d} = 464 \text{ м/с.} \quad (7)$$

Поперечная составляющая скорости примерно в 2 раза больше продольной составляющей скорости ионов, следовательно, происходит увеличений ширины ионного «купола». При расстоянии 8 мм от заземленного плоского электрода до конца иголки ширина области с ионным потоком будет составлять 16,6 мм.

3.5 Расчет зарядов

Для расчета заряда на иголке воспользоваться формулой [3, стр. 29] для поля в конфигурации электродов иголка – плоскость (рис. 1):

$$E = \frac{2Uc}{(c^2 - \lambda^2) \lambda \ln \frac{c + \lambda_1}{c - \lambda_1} \sqrt{\frac{x^2}{\lambda^2} + \frac{y^2 + z^2}{(c^2 - \lambda^2)^2}}}. \quad (10)$$

Поверхность иглы аппроксимируется как гиперboloид вращения.

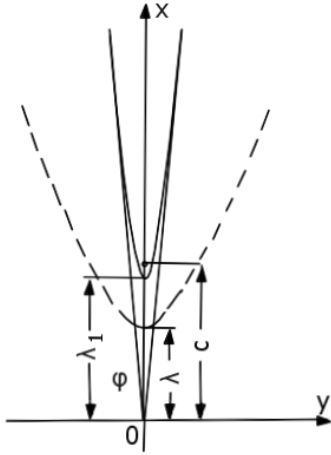


Рис.1. Поле в конфигурации электродов гиперboloид вращения – плоскость

Обозначения переменных λ, λ_1 , с показаны на рис.

1. В формуле (10) λ определяет данную эквипотенциальную поверхность. Параметр $\lambda_1 = \lambda$ определяет поверхность иглы.

Чтобы найти заряд на поверхности иглки, выразим поверхностную плотность зарядов σ на игле из граничных условий и проинтегрируем ее по поверхности иглы:

$$\sigma = \frac{E}{4\pi} = \frac{Uc}{2\pi(c^2 - \lambda^2)\lambda \ln \frac{c+\lambda_1}{c-\lambda_1} \sqrt{\frac{x^2}{\lambda^2} + \frac{y^2+z^2}{(c^2 - \lambda^2)^2}}}. \quad (11)$$

$$q = \int \sigma ds = \int \frac{A ds}{\sqrt{x^2 + B(y^2 + z^2)}}, \quad (12)$$

где введены обозначения $A = \frac{2Uc}{(c^2 - \lambda^2)\lambda \ln \frac{c+\lambda_1}{c-\lambda_1}}, B = \frac{1}{(c^2 - \lambda^2)^2}$.

Уравнение поверхности иглы (13):

$$x = \lambda \sqrt{1 + \frac{y^2 + z^2}{c^2 - \lambda^2}}. \quad (13)$$

Вычисление интеграла:

$$ds = 2\pi r dx,$$

$$z = r \sin \varphi,$$

$$y = r \cos \varphi,$$

$$r^2 = y^2 + x^2,$$

$$r = \sqrt{(c^2 - \lambda^2) \left(\frac{x^2}{\lambda^2} - 1 \right)},$$

$$q = \int_{\lambda_1}^h \frac{A}{2} \sqrt{\frac{(c^2 - \lambda^2) \left(\frac{x^2}{\lambda^2} - 1 \right)}{\frac{x^2}{\lambda^4} + B(c^2 - \lambda^2) \left(\frac{x^2}{\lambda^2} - 1 \right)}} dx. \quad (14)$$

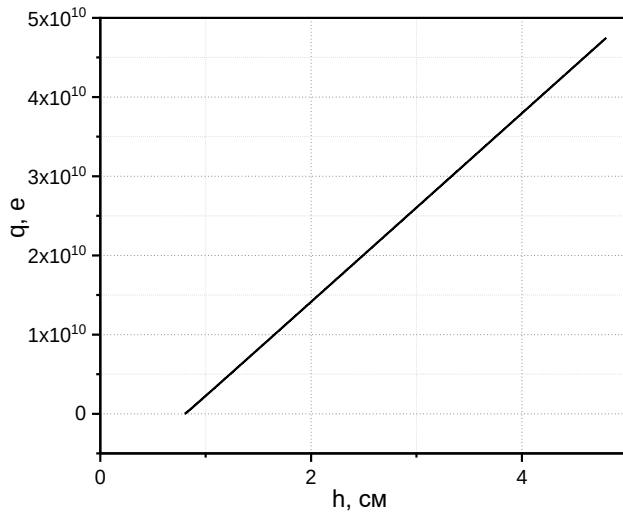


Рис. 2. Зависимость суммарного заряда на иглке от высоты

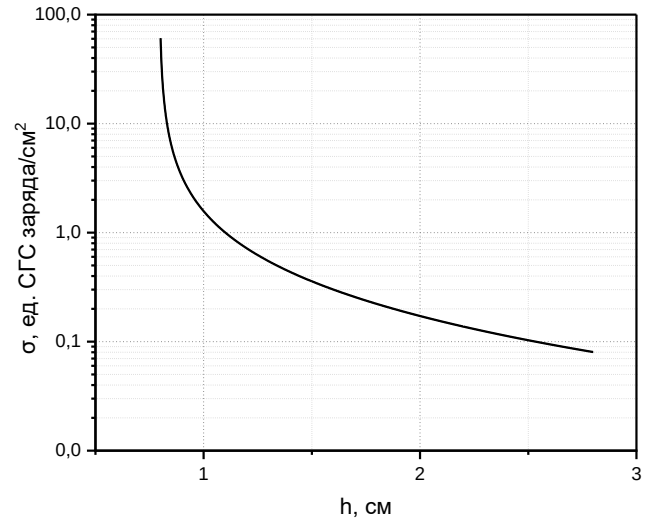


Рис. 3. Зависимость поверхностной плотности заряда на иглке от высоты

При параметрах $c - \lambda_1 = 50$ мкм, $\lambda_1 = \lambda = 0,8$ см, $h = 2,8$ см (расстояние от заземленного электрода до конца иглы) интеграл (14) равен $q = 2,36 * 10^{10}$ е. При, $h = 1,4$ см, $q = 7 * 10^9$ е.

Построен график зависимости заряда на иглке от h (рис. 2). Также построен график зависимости поверхностной плотности заряда на игле от высоты (рис. 3).

Ионы, находящиеся в пространстве между иглой и заземленным электродом, создают объемный заряд, который равен:

$$q_V = nV = 2,98 * 10^{10} * 1,2 = 3,6 * 10^{10} \text{ е}, \quad (15)$$

где $n = 2,98 * 10^{10}$ ионов/см³, $V = 1,2$ см³.

Заряд на верхней пластине равен:

$$Q = CU = \frac{\epsilon_B S_{\text{п.и.}}}{d_K} U = \frac{1 * 4,52 * 33}{1,5} = 2,07 * 10^{11} \text{ е},$$

где $d_K = 15$ мм – расстояние между нижним и верхним плоскими электродами, C – емкость плоского конденсатора, $U = 33$ СГСЭ – напряжение в конденсаторе, $S_{\text{п.и.}} = 452$ мм² (из пункта 4.1).

3.6 Расчет сил

Для расчета силы Кулона представим, что ион взаимодействует кулоновски с объемным зарядом, находящимся от него на расстоянии $r = 5$ мм. Тогда сила Кулона равна:

$$F_K = \frac{qVe}{r^2} = \frac{3,6 \cdot 10^{10} \cdot (4,8 \cdot 10^{-10})^2}{0,5^2} = 8,3 \cdot 10^{-14} \text{ дин} = 8,3 \cdot 10^{-14} \text{ Н.} \quad (16)$$

Для расчета магнитной силы Лоренца рассмотрим два иона, которые движутся в одном направлении параллельно друг другу. Сила их взаимодействия на расстоянии $r = 5$ мм будет равна:

$$F = \frac{e^2}{r^2} \frac{v}{c^2} = 2,02 \cdot 10^{-40} \text{ Н.} \quad (17)$$

Сила магнитного взаимодействия ничтожно мала по сравнению с силой Кулона, следовательно, ей можно пренебречь при расчетах.

3.7 Расчет энергий в коронном разряде

Схема установки, используемой в эксперименте показана на рис. 5.

Мощность, подаваемая в конденсатор, равна:

$$P = IU = 5,1 \cdot 10^{-5} \cdot 10^4 = 0,51 \text{ Ватт.} \quad (18)$$

Мощность, расходуемая на разгон ионов O_2^- , равна:

$$P = \frac{m_{O_2} v_{||}^2 n V v_{||}}{2l} = 7,7 \cdot 10^{-7} \text{ Ватт,} \quad (19)$$

где $V = 1,2 \text{ см}^2$ – объем зоны ионизации, $l = 1,4 \text{ см}$ – расстояние между электродами, $n = 2,98 \cdot 10^{10} \text{ ионов/см}^3$ – концентрация ионов, $v_{||}$ – продольная скорость ионов O_2^- . Мощность, расходуемая на разгон ионов, составляет $1,6 \cdot 10^{-4} \%$ от полной мощности, подаваемой в конденсатор.

Разогнанные электроны соударяются с молекулами воздуха и отдают им свою энергию. Закон сохранения энергии:

$$P = \frac{m_{O_2} v_{||}^2 n V v_{||} + m_0 v_0^2 n_0 V v}{2l}, \quad (20)$$

где $m_0 = 4,8 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ – средняя масса молекулы воздуха, v_0 – скорость молекул воздуха, $n_0 = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ 1/м}^3$ – концентрация молекул воздуха.

Выразим скорость молекул воздуха:

$$v_0 = \sqrt{\left(\frac{2lP - m_{O_2} v_{||}^3 nV}{m_0 n_0 V v_{||}}\right)} = 6,2 \text{ м/с.} \quad (21)$$

Мощность, расходуемая на разгон молекул воздуха:

$$P = \frac{m_0 n_0 V v_0^2 v_{||}}{2l} = 0,447 \text{ Ватт,} \quad (22)$$

что составляет 91,7 % от мощности, подаваемой в конденсатор.

Из полученных соотношений для мощностей следует, что ионы коронного разряда увлекают нейтральные молекулы воздуха: появляется так называемый «электрический ветер».

3.8 Предельный заряд микрочастицы

Предельный заряд микрочастицы выражается формулой [1, стр. 149]:

$$q_{\Pi} = \xi \frac{Ed^2}{4} \text{ (СГСЭ),}$$

где коэффициент $\xi = \frac{3\varepsilon}{(\varepsilon+2)} = 1,65$, ($\varepsilon = 2,458$ – диэлектрическая проницаемость КВг [6, стр. 8224]). Для поля $E = 10^6$ В/м и диаметра микрочастиц $d_{KBr} = 3$ мкм, получаем:

$$q_{\Pi} = 2570 e.$$

Зависимость заряда на микрочастице от времени:

$$q(t) = \frac{q_{\Pi} t}{t+t_0},$$

где $t_0 = \frac{1}{e\pi n Z_{O_2}}$ – постоянная времени зарядки микрочастицы [1, стр. 149].

При концентрации $n = 2,98 * 10^{10}$ ионов/см³, получим $t_0 = \frac{1}{4,8 * 10^{-10} * 3,14 * 2,98 * 10^{10} * 672} = 3,3 * 10^{-5}$ сек. Построена зависимость заряда частиц с разными размерами от времени (рис. 4), из которой видно, что время зарядки микрочастицы не зависит от ее размера.

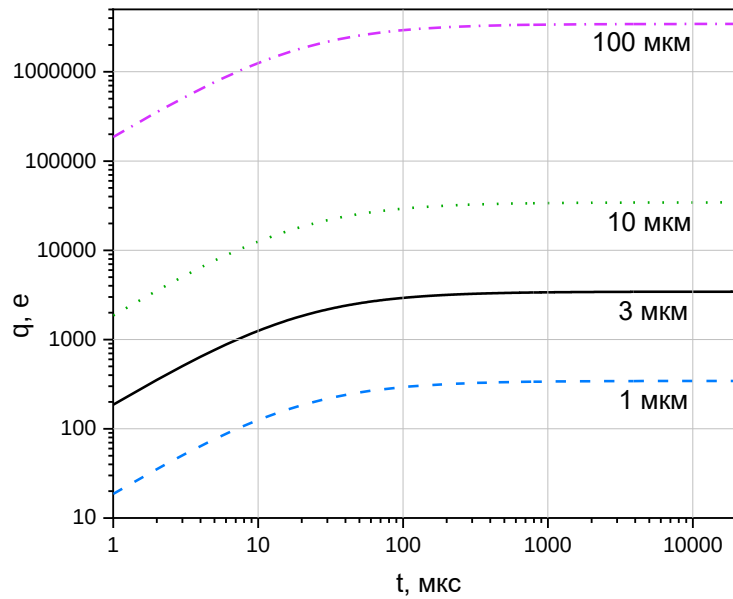


Рис. 4. Кинетика зарядки микрочастиц с разными размерами в ионном потоке

3.9 Уравнение движения микрочастицы

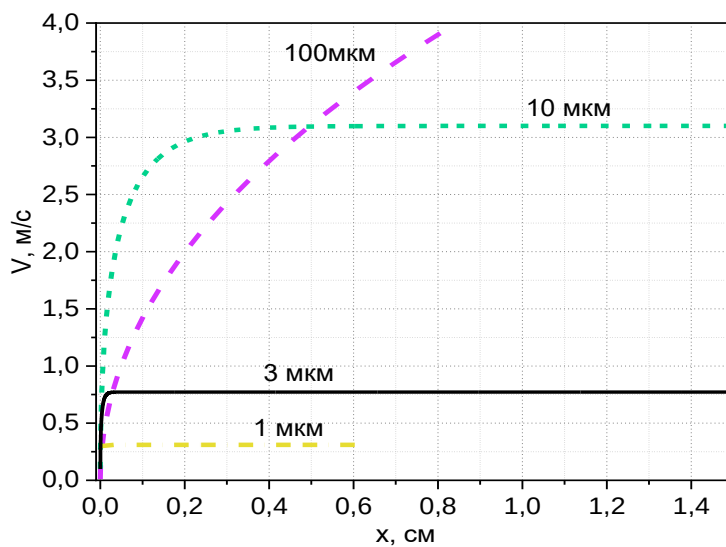


Рис. 5. Зависимость продольной скорости микрочастиц КВг от расстояния между электродами в зависимости от диаметра

Уравнение движения микрочастицы в поле конденсатора будет аналогично уравнению движения для иона (2). Поправку Каннингема для кристаллов КВг примем равной ≈ 1 , так как $d_{KBr} = 3$ мкм.

Характерное время $\tau = \frac{m_{KBr} C_c(KBr)}{3\pi\mu_B d_{KBr}} = \frac{\rho_{KBr} d_{KBr}^2}{18\mu_B} = 0,7 \cdot 10^{-4}$ сек.

Предельная продольная скорость $v_{пр.} = \frac{q_n E C_c(KBr)}{3\pi\mu_B d_{KBr}} = \frac{2570 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^6 \cdot 1}{3 \cdot 3,14 \cdot 1,86 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 10^{-6}} = 0,8$ м/с.

Построен график зависимости продольной скорости микрочастиц от расстояния в зависимости от диаметра микрочастиц (рис. 5), из которого видно, что скорость кристаллов с диаметром 3 мкм можно считать постоянной в пространстве между электродами.

Найдено время осаждения:

$$t \approx \frac{l}{v_{\text{пр.}}} = \frac{1,4}{78} = 0,018 \text{ сек.},$$

где $l = 14$ мм – расстояние между плоскими электродами.

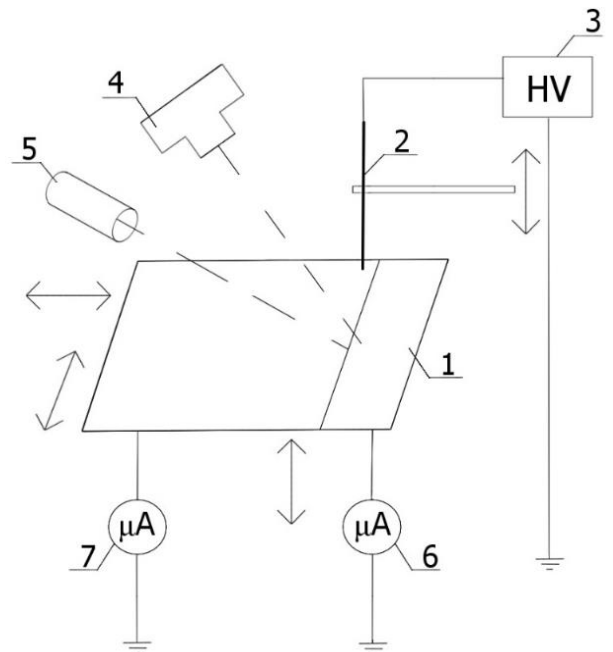
3.10 Длины осаждения микрочастиц

Зная время движения микрочастиц по направлению электрического поля, найдем длину осаждения их в электростатическом пробоотборнике. Скорость потока микрочастиц $v = 1,5$ м/с. Тогда длина осаждения равна $L = t * v = 0,018 * 1,5 = 0,027$ м = 2,7 см.

4. Экспериментальная часть

4.1 Измерение тока на пластинах

Рис.6. Схема установки: 1 – нижний заземленный электрод из алюминиевой фольги с разрезом по прямой линии и микро-подвижками по вертикали и горизонтали, 2 – иголка на изолирующем кронштейне с микро-подвижкой по вертикали, 3 – высоковольтный источник -10 кВ, 4 – фотокамера, 5 – осветитель, 6 – микроамперметры. Стрелки указывают направления возможных микро-перемещений



Оптическая ось фотокамеры была наклонена к плоскости заземленного электрода под углом около 45° , ось осветителя – 15° . В качестве иголок были

использованы стальные канцелярские булавки с параметрами: радиус кривизны кончика 60 ± 10 мкм, длина конусной части 1,7 мм, диаметр цилиндрической части 0,56 мм, длина 2 см.

К каждой пластине был подключен микроамперметр, ток измерялся при изменении положения иглки по горизонтали перпендикулярно разрезу фольги (ширина разреза 0,1 – 0,2 мм). Получена интегральная зависимость тока от координаты (рис. 7). Из рис. 7 следует, что изменение тока происходит в диапазоне от $x = -12$ мм до $x = 12$ мм. Следовательно, площадь потока

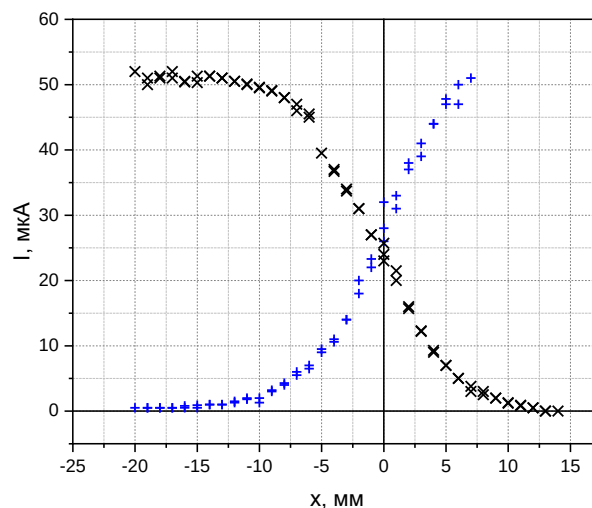


Рис. 7. Зависимость интегрального тока на пластинах от координаты иглы по горизонтали. Высота кончика иглы над заземленным электродом 8 мм.
+ - показания с левого электрода, × - показания с правого электрода

ионов на заземленном электроде равна $S_{\text{п.и.}} = \pi r^2 = 3,14 * 12^2 = 452 \text{ мм}^2$. Средняя площадь потока ионов в пространстве между электродами равна $\langle S_{\text{п.и.}} \rangle = 226 \text{ мм}^2$. Плотность тока на заземленном электроде плавно спадает с увеличением координаты от центра. Также из рис. 7 видно, что распределение плотности тока является симметричным относительно иглки по горизонтальной координате. Суммарный ток с обоих микроамперметров постоянен и равен 51 ± 1 мкА. Это означает, что разрез фольги не вносит возмущений в распределение плотности тока на нижнем электроде.

4.2 Исследование пятен на фольге при коронном разряде

При коронном разряде на алюминиевой фольге образуются пятна белого цвета. При строго перпендикулярном положении иглы относительно заземленного электрода, пятно получается формой близкой к круглой (рис. 8).

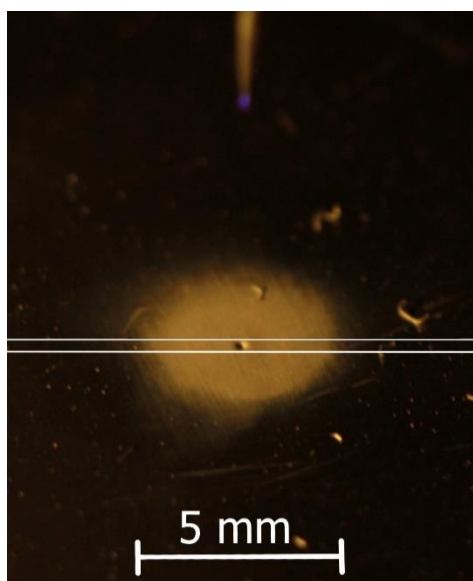


Рис. 8. Пятно на фольге при коронном разряде, 18 минут от начала включения источника. Профиль яркости получен по полоске между двумя белыми прямыми. Точка в центре – прокол иглой при контакте с поверхностью. Игла видна над центром пятна

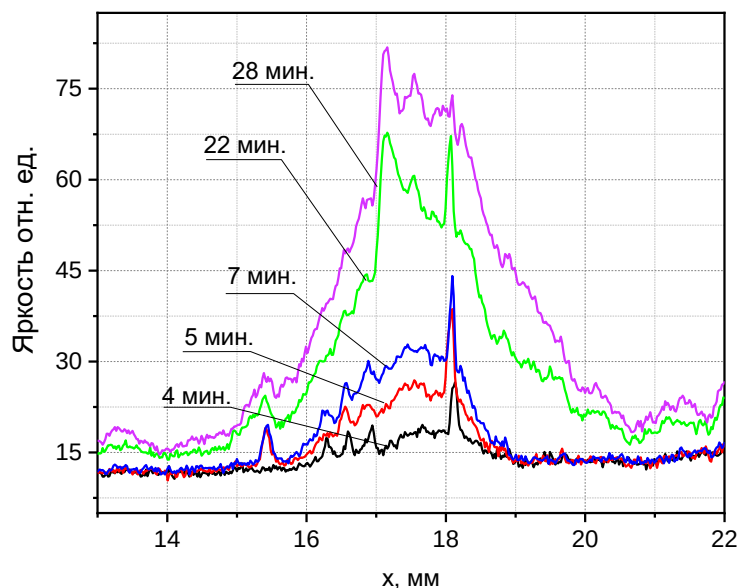


Рис. 9. Зависимость яркости фото от координаты по горизонтали через середину пятна от одной иглы (см. рис. 8)

Был проведен эксперимент (схема рис. 6), в котором наблюдалось изменение характеристик (плотности и размера) пятна на фольге в зависимости от времени с начала включения источника. Ток на игле был в диапазоне 49 – 50 мкА в течение всего эксперимента. Через определенные интервалы времени производилась фото-регистрация.

Обработка фотографий: фотографии переводились в матрицу в программе Origin, затем выбиралась полоса, проходящая через центр пятна, по длине которой производилось сканирование. По ширине производилось усреднение по яркости, полученные значения переносились на график (рис. 9).

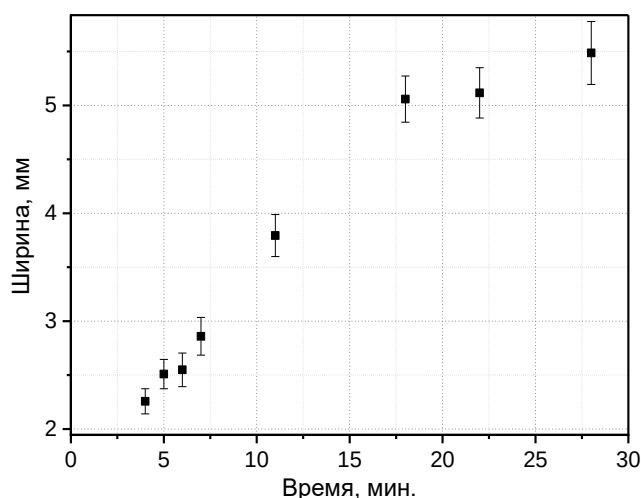


Рис. 10. Зависимость ширины графиков рис. 8 от времени

Построены графики зависимости ширины и высоты графиков с рис. 9 от времени (рис. 10, 11). Из рис. 10, 11 следует, что характерная ширина пятна и его плотность увеличивается с увеличением времени работы коронного разряда. Причем ширина пятна постепенно выходит на предел около 5,5 мм за 30 минут.

Также был проведен опыт с двумя иглками и дополнительным верхним плоским электродом (схема рис. 12), при расстоянии от конца иглолок до заземленного электрода 7 – 9 мм, среднем токе на каждой иглке 22 мкА. Расстояние от верхнего плоского электрода до нижнего – 14 мм.

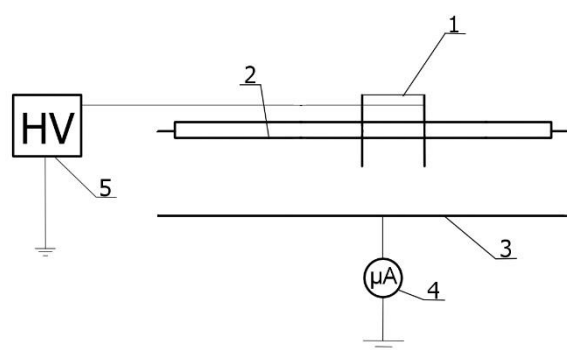


Рис. 12. Схема установки при подключении двух игл с дополнительным электродом: 1 – иглки, 2 – дополнительный электрод, 3 – нижний электрод с алюминиевой фольгой, 4 – микроамперметр, 5 –

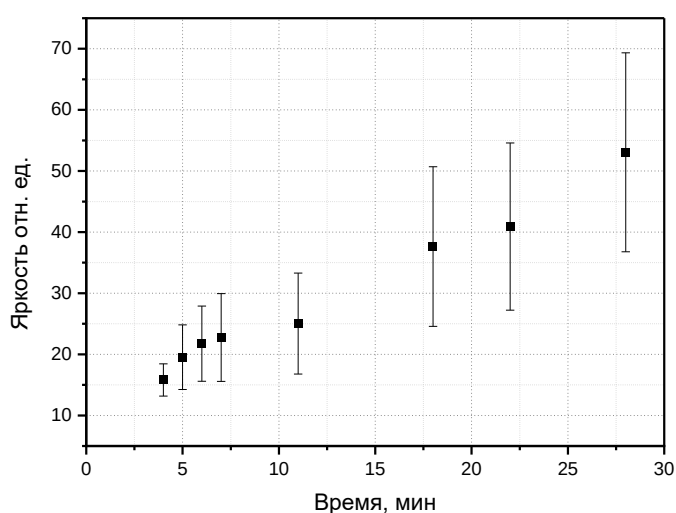


Рис. 11. Зависимость высоты графиков рис. 8 от времени

Фотографии пятен от двух иглолок показаны на рис. 13. Пятна в этом случае получились диаметром $0,95 \pm 0,05$ см, края резкие, форма близкая к круглой. Время формирования пятен около 30 мин. Проведена фотометрия правого пятна с рис. 13. Фотометрия производилась по аналогии с предыдущим опытом. График яркости фото от координаты

по горизонтали через середину пятна показан на рис. 14. Наблюдается резкая граница и соответственно п-образный профиль пятна.

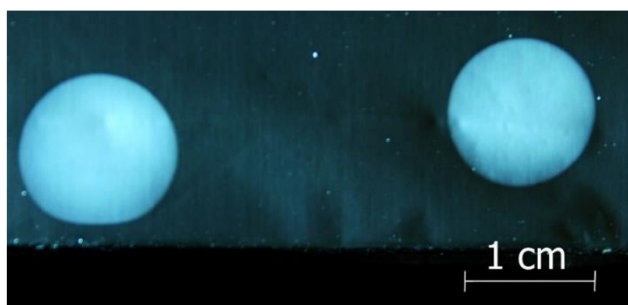


Рис. 13. Пятна на фольге при подключенном дополнительном

Сравним с результатами предыдущего эксперимента: при добавлении дополнительного верхнего электрода, даже при меньшем в 2 раза токе, размер пятна увеличился в 1,8 раз ($d = 9$ мм), края стали резкими. Из этого можно

сделать вывод: ионы, обладая недостаточной кинетической энергией в случае отсутствия дополнительного верхнего электрода, не вступают в реакцию с фольгой (рис. 8). Из пункта 3.5 следует, что заряд на дополнительном электроде в несколько раз превышает заряд на иглке и объемный заряд, что резко увеличивает вертикальную составляющую напряженности. В этом случае все ионы, летящие в потоке, вступают в реакцию с алюминиевой фольгой. Таким образом, получается резкая граница между

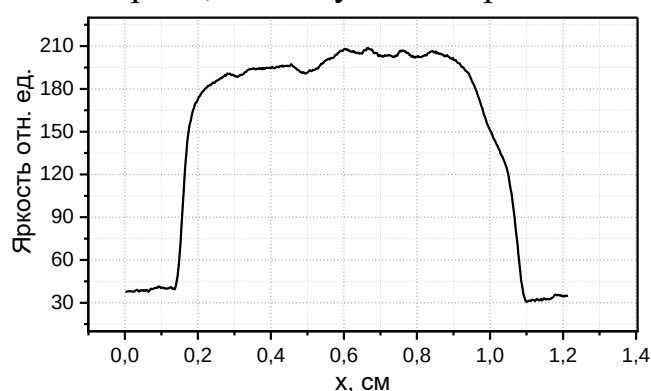


Рис. 14. Зависимость яркости правого пятна с рис. 13 от координаты по горизонтали через середину пятна при дополнительном электроде

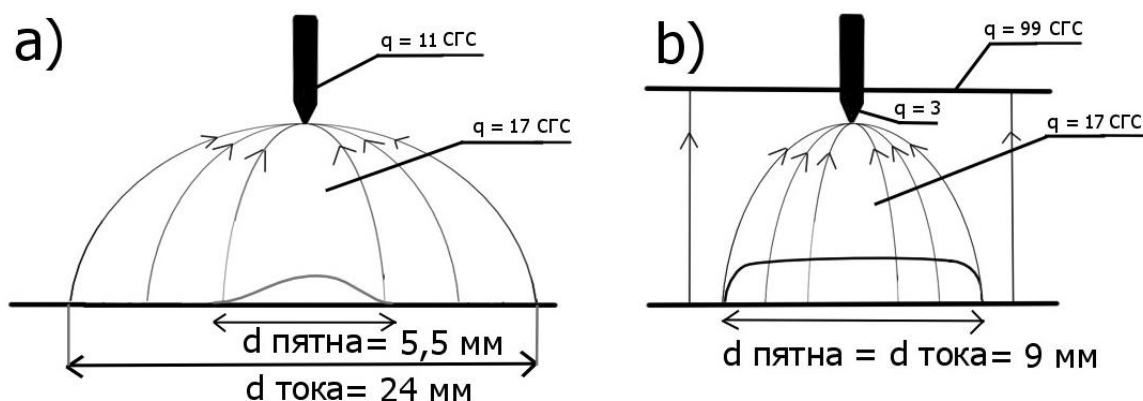


Рис. 15. Схема конфигурации электрического поля и формы осадка: а) без дополнительного электрода, б) с дополнительным электродом

пятном и фоном. Это дает представление о форме и величине объема с ионами, представленного на рис. 15.

Также был проведен эксперимент с 25 подключенными иглками и дополнительным электродом. (схема аналогична схеме из предыдущего эксперимента рис. 12). Средний ток, проходящий через каждую иглку, равен 14 мкА, расстояние от конца иглонок до заземленного электрода – 7–9 мм. Образовавшиеся пятна показаны на рис. 16.

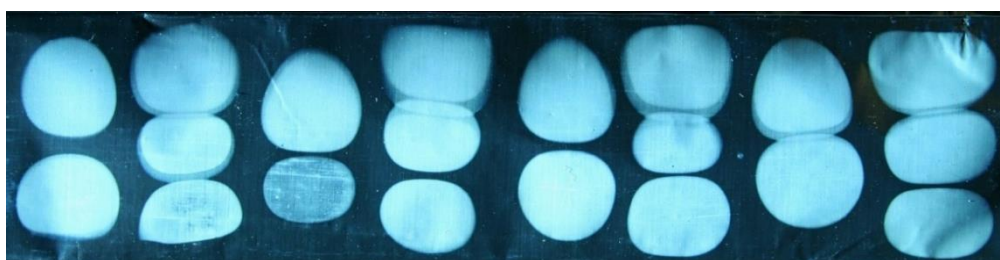


Рис. 16. Пятна от 20 иглонок при дополнительно подключенном электроде

Как следует из рис. 16, форма пятен изменяется при приближении иглонок друг к другу. Пятна уменьшаются в том направлении, при котором иглы находятся близко друг к другу, и расширяются в перпендикулярном.

Этот эффект можно объяснить кулоновским отталкиванием ионных потоков от соседних иглонок.

4.3 Осаждение микрочастиц в поле коронного разряда

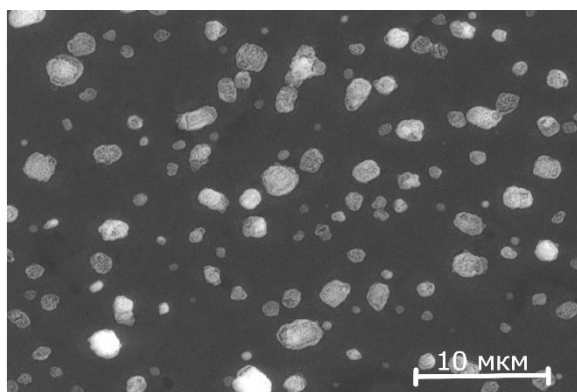


Рис. 17. Кристаллы KBr

Проведен эксперимент по осаждению микрочастиц KBr (рис. 17) с размером $d = 3$ мкм в электростатическом пробоотборнике. Сначала подавался поток KBr без поданного напряжения (рис. 18 а). Далее на обкладки подавалось напряжение –10 кВ (рис. 18 б). Скорость подаваемого двухфазного

потока микрочастиц рассчитана с помощью расходомера и равна 1,5 м/с. Сечение канала пробоотборника равно 2,8 см².

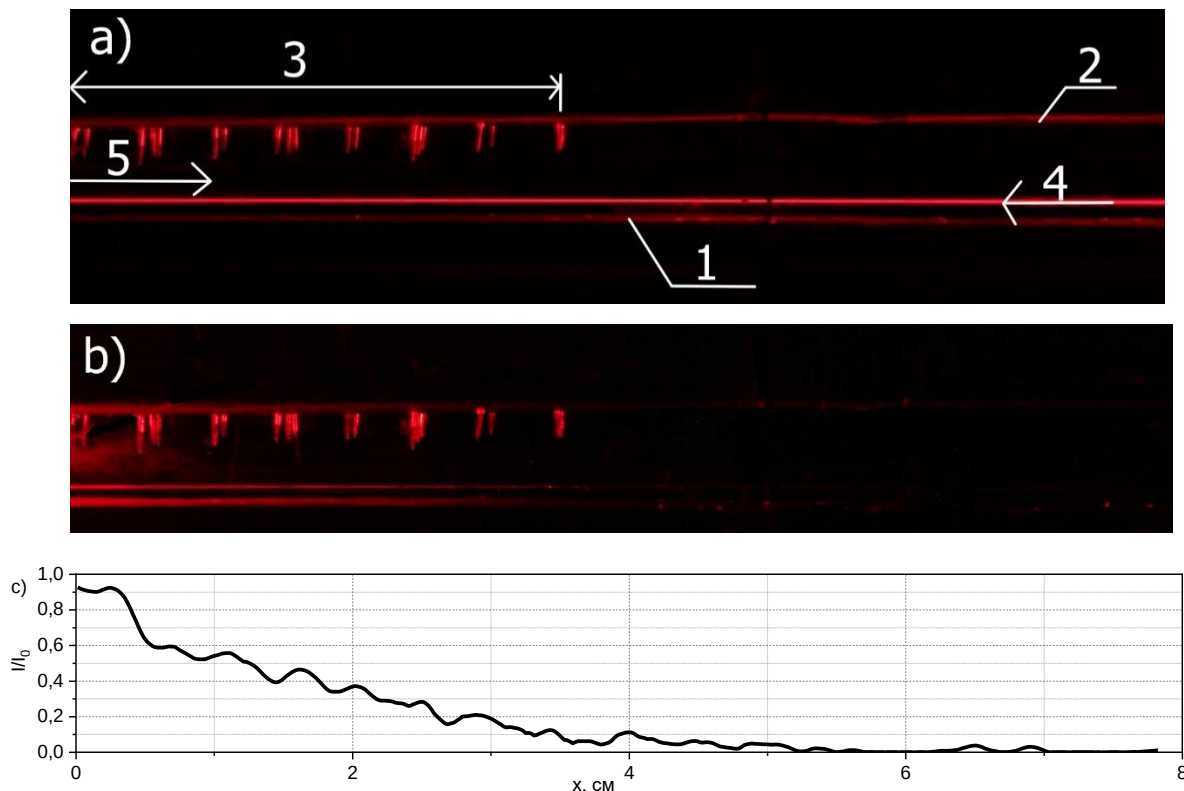


Рис. 18. Рассеяние лазерного луча на микрочастицах в канале пробоотборника: а) фотография до подачи напряжения: 1 – нижний заземленный электрод, 2 – верхний электрод (~ 10кВт), 3 – иглы, создающие коронный разряд (~ 10 кВт); 4 – лазерный луч (стрелка справа налево – направление распространения луча); 5 – стрелка слева направо – направление движения аэрозольного потока; б) фотография при включенном напряжении; в) интенсивность рассеянного лазерного луча как функция продольной координаты

Как следует из фотографии (рис. 18, а), до подачи напряжения луч имеет постоянную интенсивность вдоль всей длины канала пробоотборника. Это указывает на то, что канал пробоотборника равномерно заполнен движущимся потоком микрочастиц. После подачи напряжения картина резко меняется (рис. 18, б). Интенсивность рассеянного на микрочастицах луча падает справа налево по мере движения потока внутри канала, вплоть до исчезновения луча на расстоянии около 6 см от входа потока в пробоотборник. Это показано на графике (рис. 18, с) фотометрирования фото (рис. 18, б) вдоль горизонтальной координаты. Исходя из общих закономерностей взаимодействия электромагнитной волны [1] с микрочастицами, уменьшение интенсивности

рассеяния соответствует уменьшению как концентрации аэрозольных частиц, так и их среднего размера. Это объясняется осаждением заряженных в коронном разряде микрочастиц на заземленном электроде.

Длина осаждения частиц 3 см сходится с расчетной 2,7 см.

5. Выводы и заключения

В работе были исследованы распределение плотности тока в пространстве между электродами при отрицательном коронном разряде типа игла–плоскость (расстояние между электродами 8 мм) с напряжением -10 кВ, динамика роста пятен продуктов реакции ионов на плоском электроде, осаждение микрочастиц в макете электростатического пробоотборника.

1) Из решения уравнения движения ионов рассчитан эффективный диаметр иона, дающий корректную величину подвижности в воздухе.

2) Из уравнения движения ионов следует, что скорость иона становится предельной через ничтожно короткое время и является пропорциональной напряженности электрического поля в данной точке.

3) Сделана расчетная оценка объемного заряда и уширения ионного «купола» за счет кулоновского отталкивания ионов с объемным зарядом: при расстоянии 8 мм от заземленного плоского электрода до конца иголки, ширина области с ионным потоком будет составлять 25,6 мм, что сходится с экспериментом.

4) Вычислен заряд на игле как функция параметров иглы с использованием модели гиперболической иглы. Объёмный заряд по величине близок к заряду на игле.

5) На экспериментальной установке была получена зависимость интегрального тока от горизонтальной координаты. Распределение получилось симметричным и плавно спадающим при увеличении расстояния от иглы.

6) Проведен фотометрический анализ пятен на заземленном электроде, в результате которого обнаружено, что при наличии дополнительного верхнего плоского электрода границы пятна становятся резкими. Этот эффект связан с «разгоном» ионов, находящихся в межэлектродном пространстве. Приобретая дополнительную кинетическую энергию, они вступают в реакцию, образуя пятно с резкими границами.

7) На установке, включающей макет электростатического пробоотборника частиц, проведены эксперименты по зарядке и осаждению микрочастиц КВг с размером ≈ 3 мкм в коронном разряде с 20 иглами. Экспериментальная длина осаждения 3 см соответствует рассчитанной теоретически 2,7 см.

6. Литература

1. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. М.; Мир, 1987. 277 с.
2. Электрон <https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрон>.
3. Верещагин И. П. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М.; Энергия, 1974, 480 с.
4. Удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков
<https://ido.tsu.ru/schools/physmat/data/res/elmag/spravochnik/text/7.html>.
5. Nagato, K., Matsui, Y., Miyata, T., & Yamauchi, T. An analysis of the evolution of negative ions produced by a corona ionizer in air. International Journal of Mass Spectrometry. 2006. 142-147 с.
6. Selvarajan, G., & Mahadevan, C. K. Studies on $(\text{NaCl})_x (\text{KBr})_{y-x} (\text{KI})_{1-y}$ solid solutions: 2. Electrical measurements. Journal of Materials Science. 2006. 8218–8225 с.
7. Potassium bromide - https://en.wikipedia.org/wiki/Potassium_bromide
8. Стишков Ю. К., Самусенко А. В., Ашихмин И. А. Коронный разряд и электрогазодинамические течения в воздухе. УФН 188. 2018. 1331–1345 с.