

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

Физический факультет

Кафедра физики сплошных сред

КУРСОВАЯ РАБОТА
**«Сравнение токов ионов и заряженных капель, создаваемых истечением
воды из конуса Тейлора»**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18345

Выполнила студентка гр. 18345

Сайкина Татьяна Андреевна

Работа выполнена

в Институте гидродинамики имени

Лаврентьева СО РАН

Лаборатория физики высоких

плотностей энергии

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор

Пальчиков Евгений Иванович

«___»_____20___ г.

Оценка _____

Куратор к. т. н. старший научный

сотрудник ИЯФ Астрелин В.Т.

«___»_____20___ г.

Аннотация

Целью работы является сравнение токов ионов и заряженных капель, создаваемых истечением воды из конуса Тейлора.

Для этой цели была собрана установка. При помощи импульсной высокоскоростной съёмки с разрешением по времени 2 мкс получены макрофотографии быстрых процессов: зарождение струи, конус Тейлора – одиночный и двойной, отдельные летящие капли в истинных пропорциях. На основании этих фотографий определены характерные размеры и формы капель в потоке. Получено изображение разряда протекающего в условиях данного эксперимента, и, видимо, не являющегося ни коронным, ни искровым. Измерены токи, связанные с токами ионов и заряженных капель.

Тема работы актуальна в наше время сразу по нескольким причинам. Во-первых, изучаемое в работе явление – вытягивание капель жидкости из капилляра под действием сильного электростатического поля используется в двух современных методах: в ионизации распылением и в электроспиннинге. Во-вторых, конус Тейлора был описан менее 60 лет назад и до сих пор фотографий экспериментов мало.

Оглавление

Введение.....	4
1 Теоретическая часть.	5
1.1 Критерий неустойчивости Рэлея заряженной капли. Типы заряженных капель в потоке.....	5
1.2 Ионные токи.....	7
1.3 Теоретические обоснования погрешностей выбранного в данной работе метода. Способы преодоления этих погрешностей.	7
2 Эксперимент.....	8
2.1 Измерение токов.....	8
2.1.1 Описание установки.....	9
2.1.2 Метод измерений.....	9
2.1.3 Результаты измерений.	10
3 Скоростная фотосъёмка конуса Тейлора, струй и летящих капель воды.	11
4 Обнаружение зависимостей измеряемых параметров друг от друга на основе полученных данных.....	12
5 Трассы свечения разрядов в воздухе	13
6 Выводы.....	13
7 Литература	14

Введение.

Капиллярные электростатические явления до сих пор являются мало исследованной областью физики. Не смотря на большое количество теоретических работ, экспериментальных работ на много меньше. В этой теме кроме гидродинамической части вопроса, большой интерес представляет поведение электрически заряженных капель и струй. Если в предыдущей курсовой работе большее внимание уделялось гидродинамическим аспектам, то в данной работе делается акцент на электрические явления.

В 1964 году сэр Джеффри Ингрэм Тейлор впервые подробно описал конус Тейлора и сделал снимки [1]. В 1968 Малькольм Доуль впервые использовал электроспрей [2]. Электроспрей, называемый ещё ионизацией распылением в электростатическом поле – это метод в масс-спектрометрии для получения потока ионов из растворов. Условия получения ионов в этом методе похожи на условия экспериментов в настоящей работе, однако имеют существенное отличие: жидкость в электроспрее – раствор, который состоит как минимум из двух компонентов – растворителя и изучаемого вещества. В настоящее время так же активно используется электроспиннинг – способ получения волокнистых полимеров вытягиванием электрически заряженных нитей расплавленного жидкого вещества под действием электрического поля из конуса Тейлора [3].

Целью нашей работы было экспериментальное обнаружение зависимости между токами ионов и заряженных капель, вытягиваемых из капилляров под действием сильного электростатического поля. А так же теоретическое обоснование наблюдаемых явлений.

В данной работе были поставлены следующие задачи:

- 1 Снять ВАХ для токов капель и ионов при положительном и отрицательном потенциалах воды

- 2 Выяснить, есть ли характерные отличия между двумя этими случаями
- 3 Сделать импульсные скоростные фотосъёмки конуса Тейлора, струй и летящих капель с микросекундным разрешением по времени.
- 4 На основе полученных снимков сделать выводы о характерных скоростях и размерах капель воды в потоке
- 5 Попытаться найти зависимости измеряемых параметров друг от друга на основе полученных данных
- 6 Пронаблюдать трассы свечения разрядов в воздухе, при напряжениях за пределами порога возникновения огней св. Эльма, когда в разрядном промежутке присутствуют капли и струи жидкости.

Для экспериментов были построены установки, при помощи которых можно получить поток заряженных капель, измерить токи, пронаблюдать условия отрыва капель воды от капилляров в электрическом поле и получить видимые глазом разряды в воздухе. Дальнейшая часть работы посвящена получению конкретных экспериментальных данных и выявлению зависимостей на их основе.

1 Теоретическая часть.

1.1 Критерий неустойчивости Рэлея заряженной капли. Типы заряженных капель в потоке.

На заряженную каплю действуют две противоположных по направлению силы. Электростатическая сила отталкивания старается разорвать каплю. Сила поверхностного натяжения противодействует ей. Поэтому для равновесного состояния капля не должна выполняться критерий неустойчивости Рэлея для заряженной капли [4, 6]: $W \equiv \frac{Q^2}{16\pi\sigma R^3} < 1$ (СГС), где W – безразмерный параметр, σ – коэффициент поверхностного натяжения, R – радиус капли, Q – заряд. Таким образом, можно определить максимальное значение модуля заряда, переносимого одной каплей:

$$Q_{\max} = 4\sqrt{\pi\sigma R^3} \quad (1).$$

Из капилляра под действием электростатического поля вытягивается конус Тейлора, с конца которого отрываются сильно заряженные капли воды [1] (см. Рисунок 1).



Рисунок 1. Рождение заряженных капель воды из капилляра.

Для того чтобы капля оторвалась от капилляра, необходимо небольшое превышение порогового значения заряда капли (1). Поэтому рождённые капли являются неустойчивыми и дробятся. Под действием электростатических сил капля чуть вытягивается с концов и эмитирует мельчайшие, невидимые глазом, дочерние капли (Рисунок 2) [5].

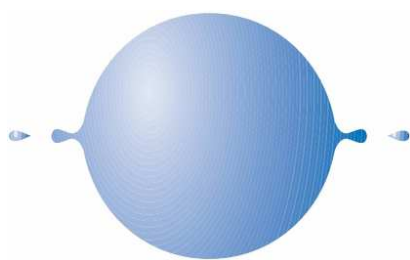


Рисунок 2. Заряженная капля вытягивается с концов и эмитирует дочерние капли.

На вытянутом острие капли образуется высокое напряжение, из-за этого капля сбрасывает больше заряда, чем необходимо для выполнения граничного условия (1).

Таким образом, в потоке одновременно существуют крупные и мелкие капли.

1.2 Ионные токи.

Напряжённость поля на границе капли с воздухом превышает пробивную прочность воздуха. ($E_{max} = \frac{Q_{max}}{r^2} \approx 210 \frac{\text{кВ}}{\text{см}} > 30 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$, значение заряда рассчитано из условия (1) при значении $R = 0,0075 \text{ см}$, полученном ниже, в разделе 3). В результате с поверхности капли в окружающий воздух идёт ударная ионизация. Полученные ионы находятся в разрядном промежутке между капиллярами, сеткой и экраном.

1.3 Теоретические обоснования погрешностей выбранного в данной работе метода. Способы преодоления этих погрешностей.

Основной погрешностью выбранного в данной работе метода измерения является оседание некоторых крупных капель на сетке. В идеале крупные капли должны оседать только на экране, расположенном за сеткой.

Вероятность оседания капли на сетке – геометрическая вероятность попадания капли на сетку с некоторой эффективной толщиной, большей реальной толщины проволоки, так как сетка притягивает каплю, изменяя её траекторию. Однако из-за очень малого заряда капли смещение капли под воздействием электрического поля сетки незначительно, поэтому эффективной толщиной сетки можно пренебречь.

Пусть x – вероятность попадания одной крупной капли на сетку. Тогда $(1 - x)$ это вероятность непопадания крупной капли на сетку. Пусть $N_э$ и N_c – количество капель, оседающих за единицу времени на экране и сетке соответственно. Тогда общее количество крупных капель в потоке $N = \frac{N_э}{1-x}$. Отсюда $N_c = xN = \frac{x}{1-x} N_э$. Ток, создаваемый крупными каплями на сетке: $I_c^{\text{кр кап}} = qN_c$, на экране: $I_э = qN_э$, где $q \leq q_{max}$ (см 1). Итак, $I_c^{\text{кр кап}} = \frac{x}{1-x} I_э$. В

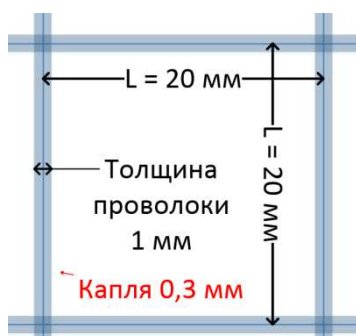


Рисунок 3

этой задаче имеется в виду геометрическая вероятность:
$$= \frac{4 \times 0,5 \times 1 \text{ мм} \times 20 \text{ мм}}{20 \text{ мм} \times 20 \text{ мм}} = 0,1.$$

2 Эксперимент.

2.1 Измерение токов

Для решения поставленной цели – измерения токов, связанных с ионным током и током капель – была собрана установка (Схема 1 а, b).

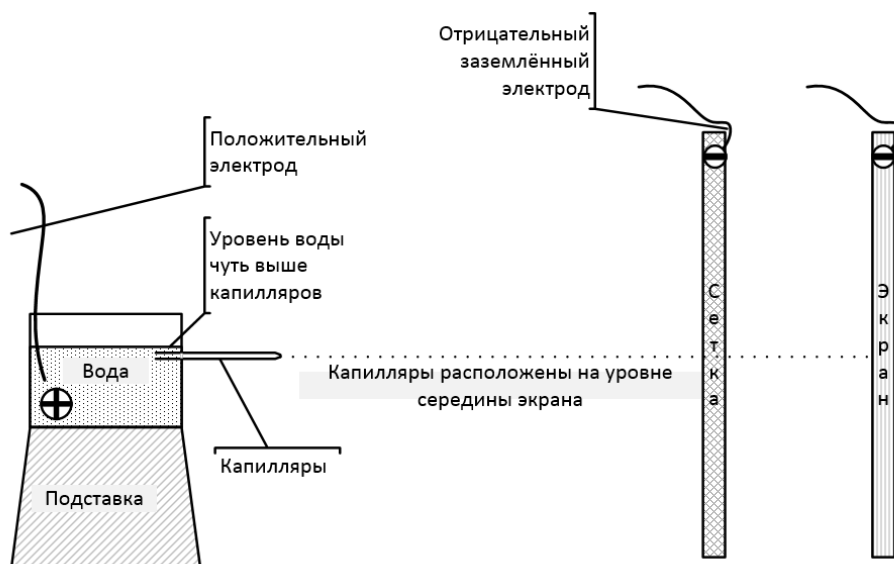


Схема 1 а. Вид сбоку. Установка для измерения токов ионов и заряженных капель, вытягиваемых из капилляров под действием сильного электростатического поля.

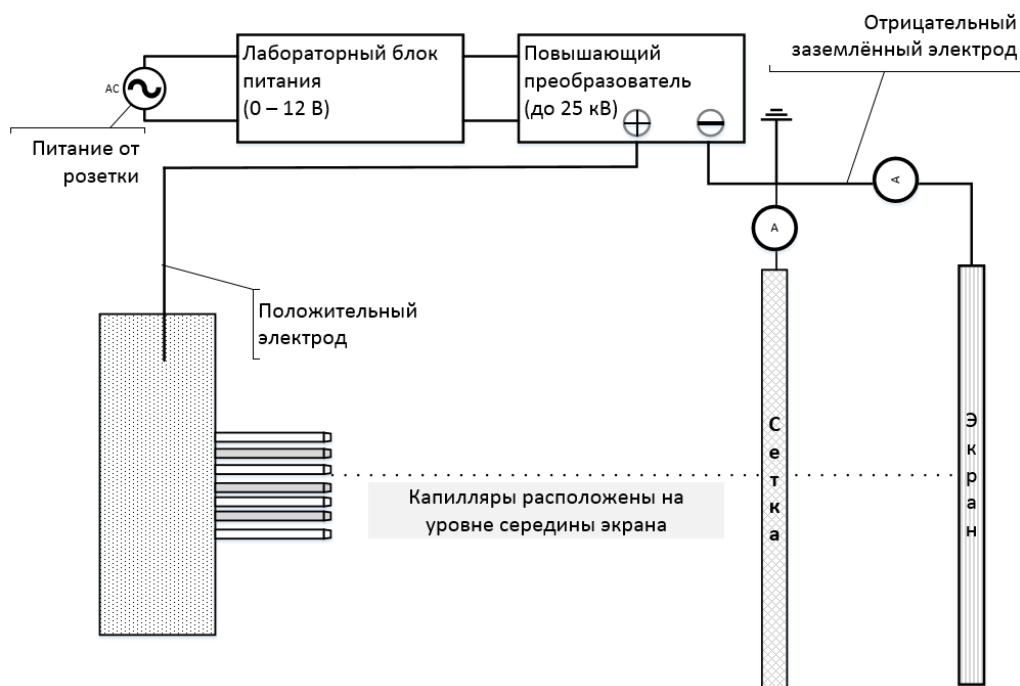


Схема 1 б. Вид сверху.

2.1.1 Описание установки.

Установка представляет собой контейнер, в стенку которого вставлены капилляры чуть ниже уровня воды в контейнере. Глубина установки капилляра такова, что вода из него не вытекает, а мениск воды с его конца чуть выступает наружу. Контейнер с водой стоит на небольшой подставке для того, чтобы капилляры находились на уровне середины высоты сетки и экрана.

Использовалась обычная водопроводная вода, пластиковые капилляры с небольшим сужением на конце диаметра 0,3 мм. Сетка сделана из проволоки толщиной 1 мм. Сетка находится на расстоянии 4,3 см от концов капилляров. В качестве экрана используется металлическая пластина размерами 15×15 см, которая находится на расстоянии 2 см от сетки. Для измерения напряжения параллельно схеме был подключён статический вольтметр со шкалой от 1 кВ до 30 кВ. Питание от сети переменного тока 220 В, для выпрямления и повышения напряжения используются лабораторный блок питания (0 – 12 В) и повышающий преобразователь (до 25 кВ).

2.1.2 Метод измерений.

Снятие ВАХ с сетки и экрана. Предполагается, что на сетке оседает незначительная часть крупных капель, большинство из них пролетает сквозь сетку и оседает на экране (см. разделы 1.3 и 4). Поэтому с учётом погрешностей можно считать, что ток сетки – это ток ионов и высокодисперсных сильно заряженных дочерних капелек, имеющих радиусы на 2 порядка меньше, чем родительские (крупные) капли. Таким образом, ток с экрана на землю – ток, переносимый крупными каплями воды. Ионы притягиваются к сетке, поэтому большая их часть не долетает до экрана.

2.1.3 Результаты измерений.

Полученные данные представлены в таблице 1, и графике 1.

Расстояния: 4,3 см капилляры - сетка, 2 см сетка - экран.							
U, В	Вода под положительным потенциалом					Вода под отрицательным потенциалом	
	Ток с сетки, мкА			Ток с экрана, мкА		Ток с сетки, мкА	Ток с экрана, мкА
№	1	2	3	1	2	1	1
11	1,8	1,8	1,8	0,2	0,1	1,9	-
11,5	2,5	2,9	2,9	0,2	0,2	2,4	0,1
12	3,2	3,9	3,9	0,4	0,4	3	0,2
12,5	4	5,3	5,5	0,6	0,6	4,8	0,3
13	5	6,4	6,4	0,7	0,7	5,9	0,4
13,5	6,6	8,6	7,7	1,1	0,9	7,5	0,6
14	8,6	11-16	9,3	1-2,3	1,7-5,9	9,3	0,7
14,5	12	-	12-14	1,-4,3	2,4-6	15,2	2,2-4
15	14,5	-	14,8-15,8	1,9-4,8	2,7-9,4	21,7-23,9	5,1-6,8

Таблица 1. Результаты 1-й части эксперимента. ВАХ сетки и экрана.

Погрешность измерений тока $\pm 0,1$ мкА.

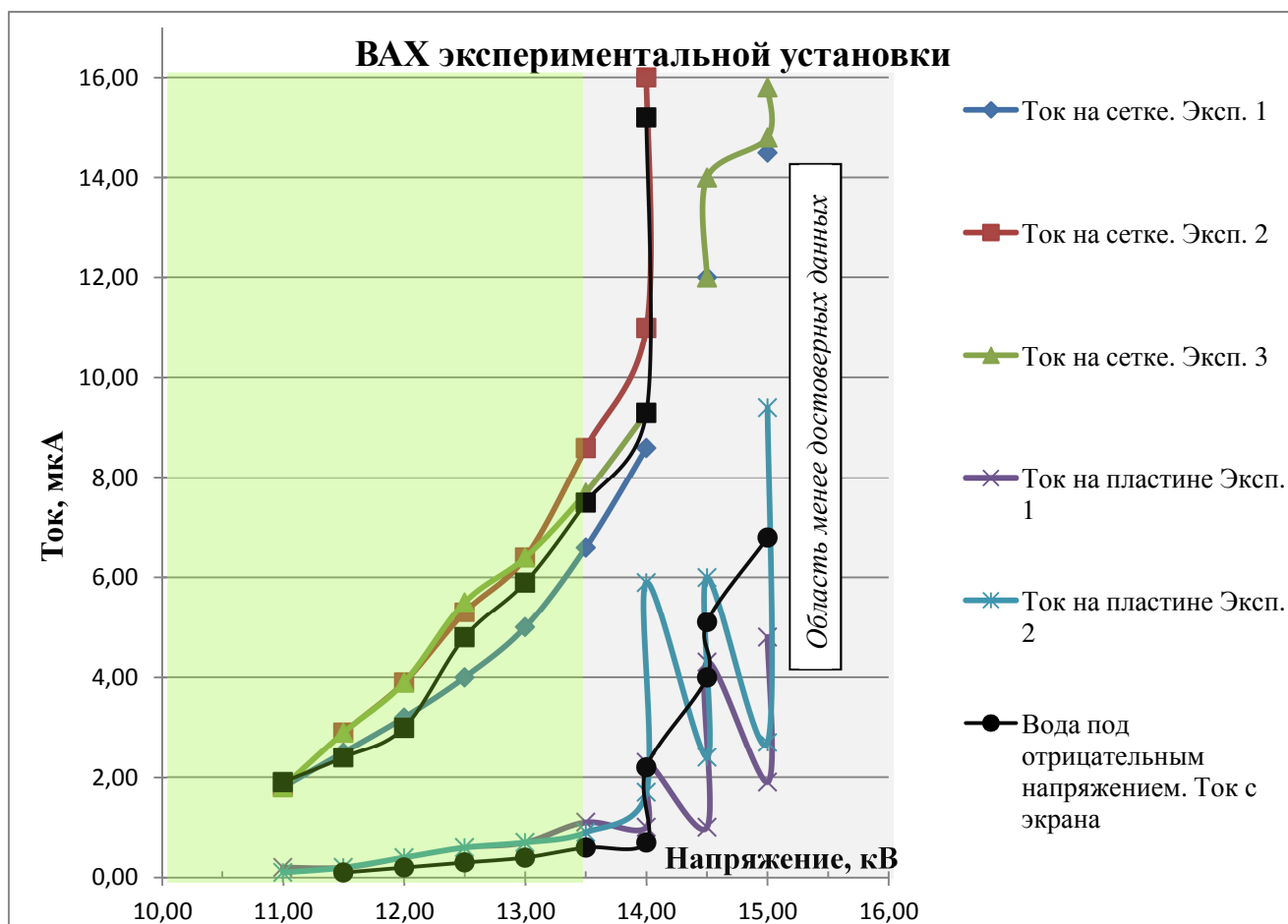


График 1. Зависимость токов сетки и экрана от напряжения. При напряжениях больших 13,5 кВ наблюдаются резкие скачки напряжения. Это происходит из-за проблем с оборудованием. Умножитель напряжения выдаёт стабильно напряжение не выше 13,5 кВ.

Как можно заметить по графику и таблице, ток сетки от знака потенциала не зависит. Однако ток экрана при отрицательном потенциале воды в 1,5 – 2 раза меньше, чем при положительном потенциале. То есть суммарный ток ионов и мелких капель не зависит от знака потенциала, а ток крупных капель заметно уменьшился. Важным наблюдением является следующий факт: ток крупных капель значительно слабее тока ионов и мелких капель.

3 Скоростная фотосъёмка конуса Тейлора, струй и летящих капель воды.

Для определения характерных размеров капель, присутствующих в потоке и выяснения характера вылета капель из капилляра применялась импульсная скоростная фотосъёмка. Фотоснимки сделаны на плёночный фотоаппарат «Зенит – Е», со штатива, на ручной выдержке в абсолютно тёмной комнате. Для получения очень коротких времён экспонирования применялась ксеноновая лампа-вспышка высокого давления со временем импульса 2 мкс. Для определения характерной скорости капель в потоке применялась обычная фотосъёмка. Полученные снимки см. в приложении.

По результатам анализа фотографий можно отметить следующие факты:

1. Капли отрываются от конуса Тейлора (см. фото 2)
2. Характерный диаметр капель около капилляра 0,15 мм (см. фото 3)
3. Собственное электростатическое поле капель заметно сильнее, внешнего, поэтому капли имеют форму шара, а не вытянутого эллипсоида (см. фото 3).
4. Из-за того что вода заряжена, струи отталкиваются друг от друга (см. фото 5), и наблюдается двойной конус Тейлора (см. фото 4).
5. Скорости крупных капель в потоке около 4 м/с (см. фото 6).

4 Обнаружение зависимостей измеряемых параметров друг от друга на основе полученных данных.

Измеряемые токи сетки и экрана не являются непосредственно токами капель и ионов. На сетку попадают крупные капли, на пути которых была проволока, а так же мелкие, дочерние капли.

В данной работе не удалось отделить ток ионов от тока мелких дочерних капель. Зато рассчитать искажения тока сетки, вносимые крупными каплями, возможно (см. раздел 1.3). Ток сетки, создаваемый крупными каплями: $I_1 = \frac{x}{1-x} * I_3 = \frac{0,1}{1-0,1} * I_3 = \frac{I_3}{9}$, где x – рассчитанная в разделе 1.3 вероятность попадания крупных капель на сетку. Таким образом, ток ионов и мелких капель: $I_2 = I_c - I_1 = I_c - \frac{I_3}{9}$. Ток экрана можно считать током крупных капель, так как мелкие капли и ионы притягиваются к сетке.

С учётом этого по данным Таблицы 1 построим График 2. Видно, что зависимость токов практически линейная.

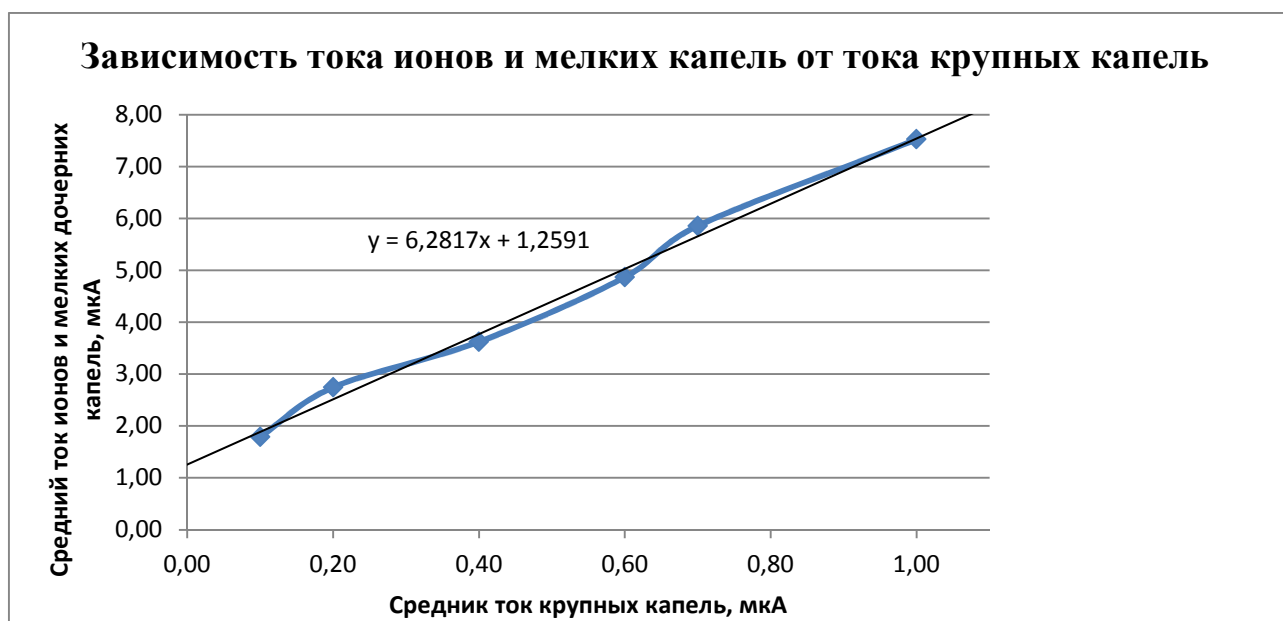


График 2. Зависимость тока мелких капель и ионов от тока крупных капель линейная.

Можно определить зависимость сопротивления участков капилляры-сетка и сетка-экран друг от друга и от напряжения. Сопротивление с увеличением напряжения падает на обоих участках и никак не зависит от времени. Сопротивление, очевидно, зависит от концентрации ионов. Из этого

можно сделать следующий вывод. Концентрация ионов повышается с увеличением напряжения и очень быстро приходит в стационарное состояние при установлении постоянного напряжения.

Вода под положительным потенциалом				
кВ	Ср. ток на сетке	Ср. ток на экране	R сетка, ГОм	R экрана, ГОм
11,00	1,80	0,15	6,11	73,33
11,50	2,77	0,20	4,16	57,50
12,00	3,67	0,40	3,27	30,00
12,50	4,93	0,60	2,53	20,83
13,00	5,93	0,70	2,19	18,57
13,50	7,63	1,00	1,77	13,50

Таблица 2. Расчёт сопротивлений, возникающих на участках капилляры – сетка и капилляры – экран.

5 Трассы свечения разрядов в воздухе

Трассы разрядов во многом повторяют траектории движения капель и траектории разлёта струй. Не исключено, что пролетевшие капли оставляют ионный след в воздухе, по которому в дальнейшем протекает разряд и происходит рекомбинационное свечение. Условия возникновения и протекания разрядов описаны, например, в [7]. В отсутствие пипетки и капель таких пробоев не наблюдается. Поэтому данное явление нельзя считать ни коронным, ни искровым разрядом (см фото 7). (Подробнее об этих двух типах разрядов см. [8].)

6 Выводы

Получена линейная зависимость тока ионов и мелких капель от тока крупных капель. Ток крупных заряженных капель примерно в 6 раз меньше тока ионов и мелких капель. Замечено, что от знака потенциала воды меняется в 1,5 – 2 раза ток крупных капель, однако ток ионов и мелких дочерних капель остаётся неизменным. С повышением напряжения падает сопротивление в промежутке между капиллярами и вторым плоским электродом – то есть с увеличением напряжения увеличивается концентрация ионов. Показано, что крупные капли отрываются от конуса

Тейлора. Из-за одноимённого заряда всех капель и струй, они отталкиваются друг от друга, что хорошо видно на фотографиях, как отдельных капель, так и двойных струй. Замечено сходство в траассах свечения разрядов с траекториями отталкивающихся капель. Сделано предположение о природе разряда: разряд протекает через ионный след, оставляемый заряженными каплями воды.

7 Литература

1. Sir Geoffrey Taylor (1964). «Disintegration of Water Droplets in an Electric Field». *Proceedings of the Royal Society A*. 280 (1382): 383–397.
2. Malcolm Dole, L. L. Mack, R. L. Hines, R. C. Mobley, L. D. Ferguson. *Molecular Beams of Macroions // The Journal of Chemical Physics*. — 1968-09-01. — Т. 49, вып. 5. — С. 2240–2249.
3. Матвеев А.Т., Афанасов И.М. «Получение нановолокон методом электроформования.» Учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы». Москва: МГУ, 2010.
4. Капиллярные электростатические неустойчивости А. И. Григорьев // Соросовский образовательный журнал, том 6, №6, 2000
5. О критериях неустойчивости заряженной капли в электростатическом подвесе А. И. Григорьев, С. О. Ширяева
6. Григорьев А.И., Сыщиков Ю.В., Ширяева С.О. // Журн.прикл. химии. 1990. Т.62,№9. С. 2020-2026.
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. 3-е изд., перераб и доп. Долгопрудный: Интеллект, 2009 734 с.
8. Князев Б.А. Низкотемпературная плазма и газовый разряд. Новосибирск: НГУ, 2003.
9. Физические величины. Справочник. Под редакцией Григорьева И.С.