

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Физический факультет
Кафедра физической электроники

Курсовая работа на тему

«ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОННОГО ВЕТРА НА ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОСТИ»

Выполнил: студент

Смирнов Даниил Игоревич

215 группа

Научный руководитель:

Бычков Владимир Львович

Оглавление

Введение.....	3
Цель работы	3
Теория.....	3
Эксперимент.....	6
Результаты.....	8
Выводы.	8
Литература.....	9

Введение

Коронный разряд представляет собой слаботочный слабосветящийся разряд, появляющийся в окрестности острия проводника. Коронные разряды в настоящее время хорошо исследованы, в воздухе он возникает при комнатной температуре и атмосферном давлении при напряжении 5 – 25 [кВ] между электродами, находящимися на расстоянии нескольких сантиметров. С увеличением напряжения корона переходит в искровой или дуговой разряд с образованием ярко светящегося канала. В работе исследуется поведение поверхности жидкости в экспериментах с коронным разрядом над поверхностью жидкостей, таких как водопроводная вода и глицерин. Такие разряды представляют интерес для решения ряда задач экологии, дезинфекции жидкостей с помощью электрических разрядов, генерации активных частиц в жидкости и приповерхностном газовом слое, плазмохимии, а также в активации горючих веществ.

Цель работы

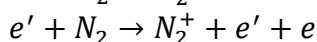
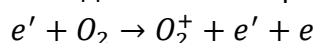
Целью настоящей работы является построение математической модели образования воронки в жидкости под острием катода и проверка экспериментом.

Теория

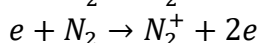
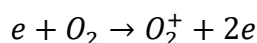
С увеличением напряжения корона переходит в искровой или дуговой разряд с образованием ярко светящегося канала. Коронный разряд в воздухе сопровождается так называемым ионным или электрическим ветром. Рассмотрим здесь кратко причину возникновения ионного ветра и связанные с ним механические эффекты. Электрическое поле на острие электрода усиливается. В сильном поле фоновые электроны, образованные при торможении космических лучей в атмосфере и при распаде радона в почве Земли, ускоряются и на некотором расстоянии от острия ионизуют воздух, см. рис. 1. Возникает плазма. Из закона сохранения количества заряда и большого числа образующихся заряженных частиц следует, что плазма является квазинейтральной, то есть число отрицательно заряженных частиц в ней приблизительно равно числу положительно заряженных частиц.

В коронном разряде при ионизации происходят следующие основные процессы:

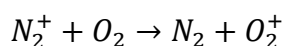
1. Ионизация молекул кислорода и азота ускоренными фоновыми электронами, приводящая к появлению ионов и медленных электронов согласно реакциям:



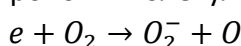
2. Образовавшиеся медленные электроны e при столкновении с молекулами O_2 и N_2 ионизуют их:



3. Положительные ионы азота N_2^+ участвуют в процессах перезарядки с образованием положительных ионов кислорода:



4. На фоне электрического поля достаточной величины в воздухе происходит диссоциативное прилипание электронов к молекулам кислорода:



Итак, положительные и отрицательные ионы кислорода являются основными сортами ионов в образующейся плазме.

Если острие заряжено положительно, то по закону Кулона отрицательные ионы притягиваются к острию и нейтрализуются на его поверхности положительным зарядом. Положительные ионы отталкиваются от острия и уходят из области их образования. При этом наличие отрицательно заряженного электрода не обязательно, но его присутствие ускоряет движение положительных ионов из-за усиления электрического поля. Ионы движутся дальше в электрическом поле электрода, чем ионы, нейтрализующиеся на его поверхности. Поэтому, согласно второму закону Ньютона, ионы приобретают больший импульс, чем электроны. Нескомпенсированный импульс положительных ионов проявляется в виде ветра в направлении от положительно заряженного электрода.

Аналогично, в случае отрицательно заряженного острия возникает ионный ветер из отрицательных ионов, направленный от острия.

Электроны играют малую роль в передаче импульса, так как имеют значительно меньшую массу и при той же скорости, что и ионы, несут значительно меньший импульс.

Схема воздействия ионного ветра на поверхность жидкости показана на рисунке 1:

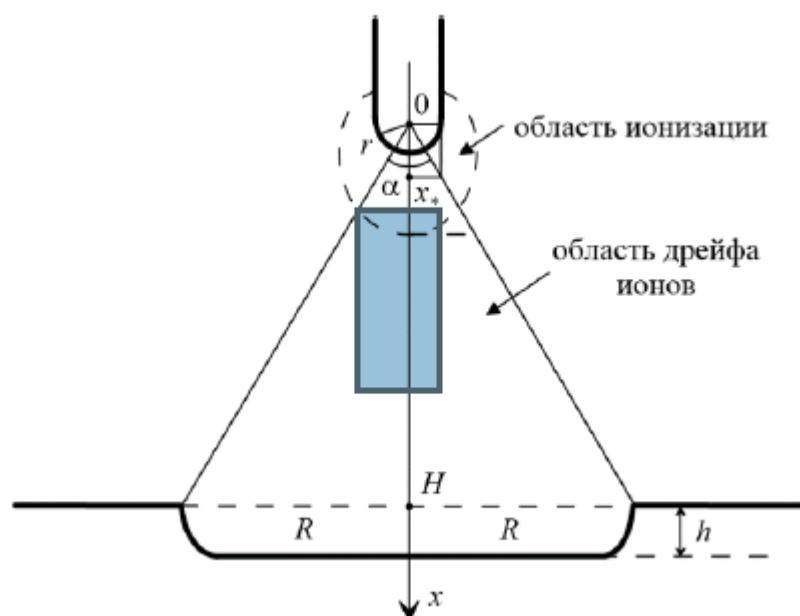


Рисунок 1. Схема воздействия ионного ветра на жидкость

Заостренный электрод с радиусом закругления r находится на расстоянии H от поверхности жидкости. Под действием ионного ветра на поверхности жидкости образуется воронка радиуса R и глубиной h . Найдем скорость воздуха под действием ускоряющихся ионов из уравнения Эйлера:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho_B} + \frac{\mathbf{F}}{\rho_B}$$

Где ρ_B и \mathbf{u} – плотность и скорость воздуха, p – давление в его течении, \mathbf{F} – плотность силы, создающей поток воздуха.

В простейшей модели пренебрежём градиентом давления по сравнению с плотностью силы электрического поля, нагревом воздуха разрядом и будем считать, что ионный ветер в области дрейфа ионов (рис. 1) образован ионами одного сорта и знака, а также что воздух в этой области движется вместе с ионами (то есть количество ионов и размер области дрейфа достаточны для того, чтобы ионы могли увлечь незаряженные частицы воздуха через упругие столкновения с ними). Тогда из уравнения Эйлера для установившегося одномерного течения воздуха получаем:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} u^2 \right) = \frac{|e_i| |E| n_i}{\rho_B} \quad (1)$$

Где $|E|$ – величина электрического поля, n_i – концентрация ионов, $|e_i|$ – заряд иона.

Учтём сопротивление среды движению ионов, выразив плотность силы $|e_i| |E| n_i$ в правой части (1) через полный ток с помощью соотношений для дрейфовой скорости ионов:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{u}_i}{\mu_i}$$

Для дрейфовой скорости ионов воспользуемся обычным представлением плотности электрического тока заряженных частиц в газе:

$$\mathbf{j} = |e_i| n_i \mathbf{u}_i$$

Получим

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\mu_i |e_i| n_i} \mathbf{j}$$

Плотность тока j выражается через полный ток I и площадь сечения $S(x)$, через которое он течёт:

$$j = \frac{I}{S(x)}$$

Тогда:

$$|E| = \frac{|I|}{\mu_i |e_i| n_i S(x)}$$

Подставляя $|E|$ в уравнение (1), имеем:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} u^2 \right) = \frac{|I|}{\rho_B u_i S(x)} \quad (2)$$

Аппроксимируем $S(x)$ площадью горизонтального сечения конуса с вершиной в точке 0 и основанием на поверхности жидкости:

$$S(x) = \pi x^2 \operatorname{tg}^2 \alpha = \pi x^2 \frac{R^2}{H^2}$$

Для плотности кинетической энергии воздуха, принимаемой в обычном смысле как плотность работы по перемещению его элементарного объема из точки $x = x_*$ в точку $x = H$, получаем из (2):

$$\frac{\rho_B u^2}{2} = \frac{|I|}{\mu_i} \int_{x_*}^H \frac{dx}{S(x)}$$

$S(x)$ имеет физическую интерпретацию площади, через которую течёт ток, начиная с точки x_* , такой, что $S(x)$ равна площади сечения провода πr^2 : $x_* = r/\operatorname{tg} \alpha = rH/R$.

Тогда

$$\frac{\rho_B u^2}{2} = \frac{|I|H^2}{\mu_i \pi R^2} \int_{x_*}^H \frac{dx}{x^2} = \frac{|I|H^2}{\mu_i \pi R^2} \left(-\frac{1}{H} + \frac{R}{rH} \right) = \frac{|I|H}{\mu_i \pi R^2} \left(\frac{R}{r} - 1 \right)$$

В соответствии с интегралом Бернулли, поток воздуха оказывает на поверхность жидкости давление

$$\Delta p = \frac{\rho_B u^2}{2} = \frac{|I|H}{\mu_i \pi R^2} \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \quad (3)$$

или при $r \ll R$

$$\Delta p = \frac{\rho_B u^2}{2} \approx \frac{|I|H}{\mu_i \pi R^2}$$

Эксперимент

Постановка эксперимента

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис.2

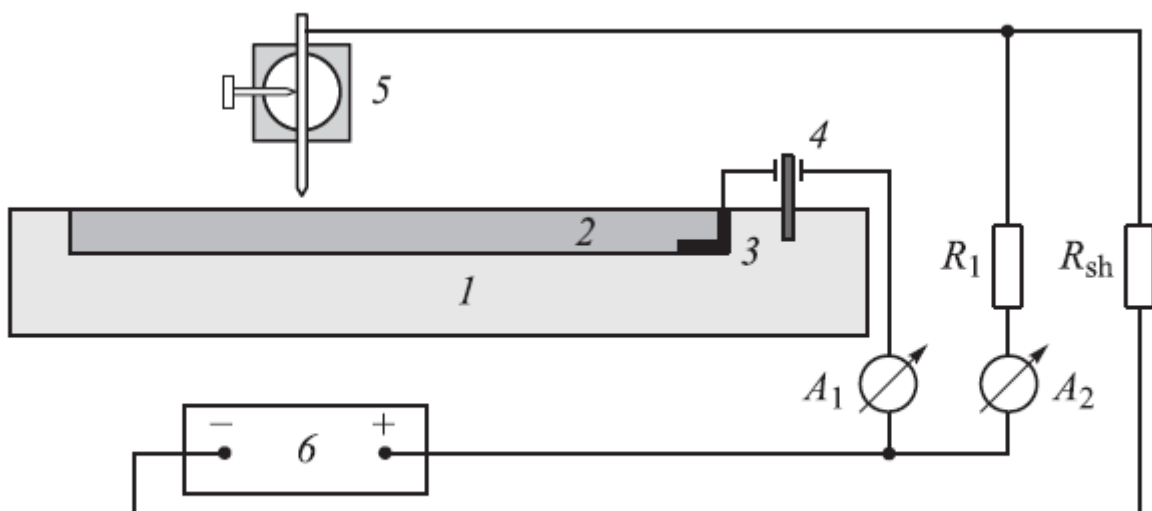


Рисунок 2. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – кювета, 2 – вода,

3 – анод, 4 – стойка, 5 – катод, 6 – источник питания

Установка состоит из кюветы, заполненной жидкостью, и электрической цепи. Верхний электрод диаметром 0.9 мм (с радиусом закругления острия 0.2 мм) или 2 (закругление 0.4

мм) был расположен на высоте 5-15 мм над поверхностью жидкости (рис. 1, 2). Электроды были под положительными или отрицательными потенциалами. Кюветы были или металлическими, или диэлектрическими. Металлические кюветы имели цилиндрическую форму (130 мм, высота 18 мм) и форму параллелепипеда (37 × 79 × 122 мм), диэлектрическая пластмассовая кювета была прямоугольной со сторонами 45 × 95 × 130 мм.

Эксперименты с разрядами над поверхностью дистиллированной воды.

Эксперименты с дистиллятом воды были проведены в кюветах круглой металлической и круглой диэлектрической кюветах в нормальных условиях. На рис. 3 показаны стадии образования столбика над поверхностью жидкости при отрицательном заряде на катоде и расстоянии 5 мм между острием и жидкостью.

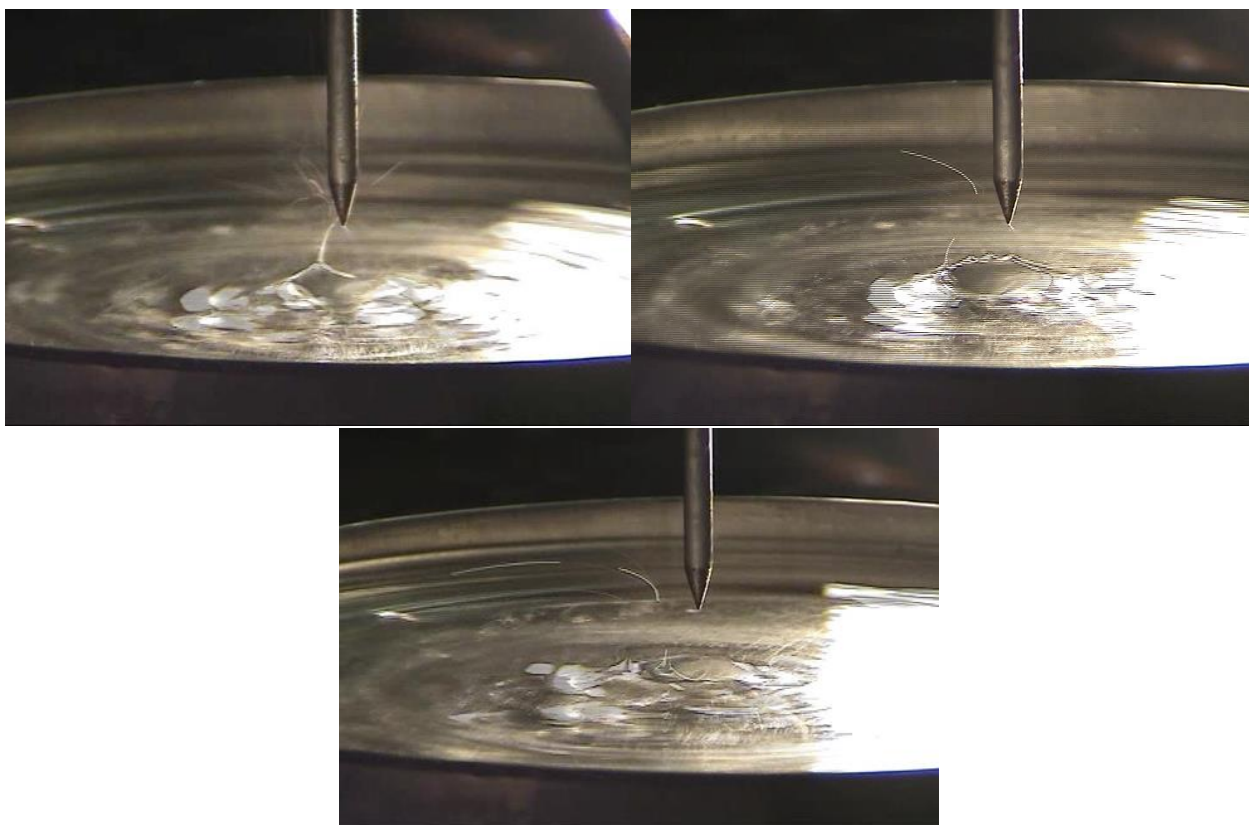


Рисунок 3 Образование столбика жидкости

При значении напряжения 5 кВ на поверхности жидкости появлялась воронка как при положительной, так и при отрицательной полярности верхнего электрода.

Эксперименты с разрядами над поверхностью спирта.

При положении верхнего электрода на высоте 11 мм и при приложенном напряжении между верхним электродом и поверхностью жидкости выше 27 кВ появляется отчетливо сформированный столбик, который представляет собой вытянутый навстречу верхнему электроду цилиндр из жидкости, заканчивающийся сферически закругленным концом (каплевидной формы). Его основание вращается по краю воронки то по направлению часовой стрелки, то против неё.

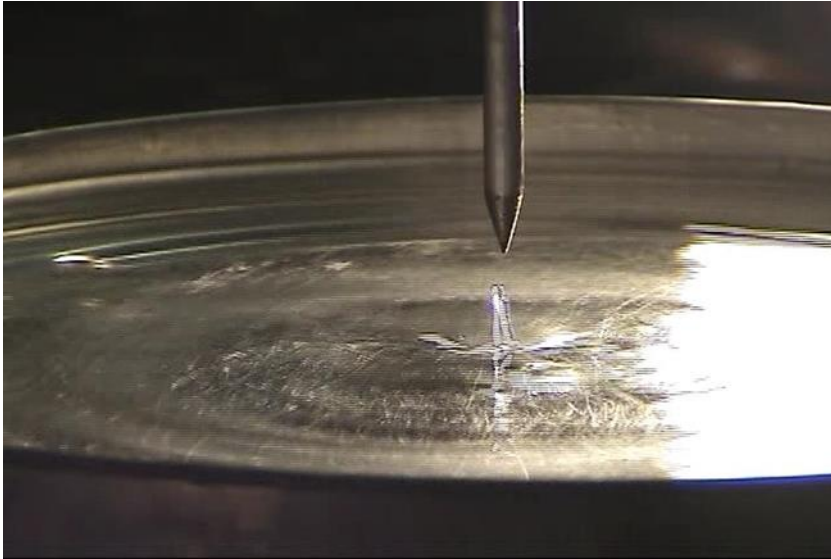


Рисунок 4 Появление столбика на поверхности спирта

Результаты.

Подставляя в (3) для ионов кислорода O^- табличное значение $\mu_i = 5 \cdot 10^{-4} [\text{м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})]$, измеренные в эксперименте постоянный ток $|I| = 30 [\text{мкА}]$, радиус воронки $R = 4 [\text{мм}]$, радиус кривизны электрода $r = 0.7 [\text{мм}]$ и расстояние между острием и поверхностью жидкости $H = 7 [\text{мм}]$, находим

$$\Delta p \approx 39 [\text{Па}] \approx 3.9 \cdot 10^{-4} [\text{атм}].$$

Давление можно также оценить, исходя из объема V , вытесненной жидкости

$$\Delta p = \frac{\rho_{\text{ж}} V g}{S(H)} = \frac{\rho_{\text{ж}} S(H) H g}{S(H)} = \rho_{\text{ж}} g h$$

Где $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости, h – глубина воронки. В эксперименте с дистиллированной водой $\rho_{\text{ж}} = 10^3 [\text{кг}/\text{м}^3]$ глубина воронки составляла $h \approx 4 [\text{мм}]$. Отсюда $\Delta p \approx 39 [\text{Па}]$, что согласуется с результатом, полученным на основе рассмотрения воздействия ионного ветра.

Выводы.

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. По литературе был изучен механизм ионизации воздуха под действием коронного разряда.
2. По литературе был изучен механизм воздействия ионного ветра на поверхность жидкости.
3. Были изучены два эксперимента с дистиллированной водой и спиртом, в которых зафиксированы на фотокамеру столбики жидкости, появляющиеся при различных потенциалах, поданных на катод.
4. В результате обработки данных было установлено соответствие между расчетными и фактическими результатами, что позволяет говорить о достоверности выбранной модели.
5. Проведенная работа позволяет провести эксперименты по воздействию положительного и отрицательного коронного разряда с поверхностью глицерина,

смесей спирта с глицерином и бутил гликолем с целью определения зависимости параметров воронок (глубины и диаметра) от вязкости диэлектрической жидкости.

Литература

1. В.Л. Бычков, Ф.С. Зайцев. Математическое моделирование электроионитных и гравитационных явлений. – М.: МАКС Пресс, 2019, 640 с.
2. А.Ф. Александров, В.Л. Бычков, Д.В. Бычков, С.А. Волков, А.А. Костюк, В.А. Черников. Электродинамические особенности взаимодействия коронного разряда с поверхностью жидкости. Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2011, № 4, с. 71–78.