

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Электрогидродинамические особенности взаимодействия коронного разряда с поверхностью жидкостиА. Ф. Александров, В. Л. Бычков^а, Д. В. Бычков, С. А. Волков, А. А. Костюк, В. А. Черников*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^аbychol@orc.ru*

Статья поступила 09.12.2010, подписана в печать 26.04.2011

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию коронного разряда над поверхностью следующих жидкостей: водопроводной и дистиллированной воды, спирта, глицерина, смесей спирта с водой и глицерином. Один из электродов находился над поверхностью жидкости, а другой был погружен в нее. Были получены три режима существования разряда над поверхностью жидкости: обычная корона, переходной режим и режим дугового разряда. В этих режимах на поверхности жидкости при действии разряда наблюдается появление углубления в виде воронки, а также струй и рассыпающихся струй, направленных в сторону верхнего электрода. Предложена качественная модель образования воронки на поверхности жидкости под действием ионного ветра, создаваемого коронным разрядом. Появление струй и рассыпающихся струй связывается с развитием неустойчивостей Тонкса–Френкеля и Релея.

Ключевые слова: коронный разряд, поверхность жидкости, вода, спирт, ионный ветер.

УДК: 537.523.3, 537.528. PACS: 52.80.Nc, 47.65.-d.

Введение

В настоящей работе исследуется поведение поверхности жидкости в экспериментах с коронным разрядом над поверхностью жидкостей, таких как водопроводная и дистиллированная вода, спирт, глицерин, смеси спирта с водой и глицерином. Такие разряды представляют интерес для решения ряда задач экологии, дезинфекции жидкостей с помощью электрических разрядов, генерации активных частиц в жидкости и приповерхностном газовом слое, в плазмохимии [1], а также активации горючих веществ. При этом в экспериментах либо поверхность жидкости является электродом, либо поверхность одного из электродов покрыта жидкостью. В работе внимание было обращено на электрогидродинамические (ЭГД) особенности взаимодействия коронного разряда с поверхностью жидкости, которые исследованы в настоящее время недостаточно полно [1]. Они представляют интерес как с точки зрения исследования ЭГД процессов в условиях газовых разрядов, так и их приложений. С точки зрения фундаментальных исследований представляет интерес ответ на вопрос: как поверхность жидкости реагирует на воздействие коронного разряда?

Классические исследования по электродинамике процессов над поверхностью жидкости были начаты в XIX в. и связаны с именем Гастона Планте [2]. Наиболее известны его фонтаны, которые показали, как преобразовать электроэнергию в движение жидкости. Однако в своих экспериментах Планте мог использовать лишь электростатический генератор с огромным внутренним сопротивлением, т.е. он не мог довести условия проведения эксперимента до реализации стадии разряда. В наших же экспериментах мы с помощью

современного оборудования смогли реализовать постоянное высокое напряжение величиной от 5 до 50 кВ и получили разряды со значениями токов от единиц микро до единиц миллиампер.

1. Постановка эксперимента

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

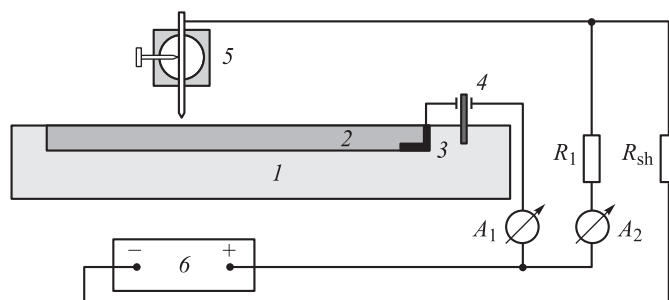


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 — кювета, 2 — вода, 3 — анод, 4 — стойка, 5 — катод, 6 — источник питания

Установка состоит из кюветы, заполненной жидкостью, и электрической цепи. Верхний электрод диаметром 0.9 мм (с радиусом закругления острия 0.2 мм) или 2 мм (с радиусом закругления острия 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 (\varnothing 130 мм, высота 18 мм) и форму параллелепипеда



Рис. 2. Появление воронки на водной поверхности. Пластмассовая кювета, расстояние между верхним электродом и поверхностью жидкости 5 мм. Отрицательная корона

(37 × 70 × 122 мм), диэлектрическая пластмассовая кювета была прямоугольной со сторонами 45 × 95 × 130 мм.

Как видно из рис. 1, ток в разряде измерялся миллиамперметром A_1 , электрическое напряжение измерялось цепью, состоящей из сопротивления R_1 и миллиамперметра A_2 . Вольт-амперные характеристики разряда измерялись и были представлены в координатах «квадрат напряжения (V^2) – ток (мА)», удобных для анализа свойств коронных разрядов [3].

Исследуемая жидкость наливалась в кювету, электрод отрицательной или положительной полярности был размещен над жидкостью перпендикулярно поверхности жидкости. В качестве источника питания использовался генератор высокого напряжения, что позволяло менять напряжение на электродах от 2 до 50 кВ с шагом 250 В. Характерная область напряжений 5–50 кВ. Появление дугового разряда между верхним электродом и поверхностью жидкости сопровождалось падением напряжения на электроде. В данном устройстве было использовано балластное сопротивление 100 МОм. Типичные значения тока через него составляли 50–100 мкА.

2. Эксперименты с разрядами над поверхностью водопроводной воды

Для проведения экспериментов над поверхностью водопроводной воды предварительно была определена ее жесткость и уровень pH. Измерения проводились с помощью тест-полосок Tetra [4]. Общая жесткость водопроводной воды в экспериментах составила $dGH = 16^\circ$, карбонатная жесткость — $dKH = 3^\circ$; здесь единица измерения — немецкий градус. Уровень pH равен 7.2.

Проделанные эксперименты показали, что под действием положительной или отрицательной короны на поверхности воды в металлической или пластмассовой кювете появляется углубление в виде воронки (см. рис. 2), причиной появления которой является ионный ветер [4, 5], как это будет показано ниже. Движение в воронке имеет сложную форму. На рис. 2 видны изменения сформированной воронки на водной поверхности.

На рис. 3 представлены вольт-квадрат-амперные характеристики коронного разряда над водой при отрицательном напряжении на верхнем электроде. Воронка под электродом появляется всегда при напряжении

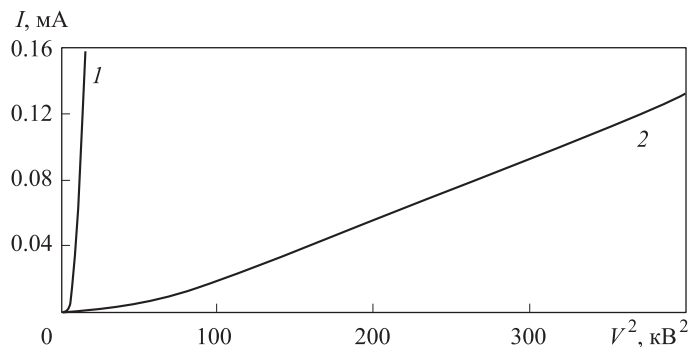


Рис. 3. Вольт-квадрат-амперная характеристика коронного разряда над водой при отрицательном напряжении. Диэлектрическая прямоугольная кювета. Глубина жидкости 20 мм, высота до верхнего электрода от поверхности жидкости 7 мм (1) и 12 мм (2)

выше 5 кВ и существует во всех областях исследуемых параметров. При напряжении ~ 12 кВ поверхность жидкости начинает дрожать (при расположении верхнего электрода на высоте 7 и 12 мм над жидкостью). В случае расположения высоты верхнего электрода на высоте 7 мм над жидкостью при напряжении ~ 6 кВ наблюдается появление искрового разряда, это указывает на переход разряда в промежуточный режим между короной и дуговым разрядом.

На рис. 4 представлены вольт-квадрат-амперные характеристики коронного разряда над водопроводной водой при положительном напряжении на верхнем электроде. Воронка на поверхности жидкости появляется всегда при напряжении $U \geq 5$ кВ и существует во всех рассматриваемых диапазонах параметров исследуемого коронного разряда. При напряжении ~ 14 кВ при обеих полярностях верхнего электрода появляется дрожание жидкости (верхний электрод находился на высоте 7 и 12 мм). В случае расположения верхнего электрода над поверхностью жидкости на высоте 7 мм при напряжении ~ 11 кВ наблюдается переход разряда

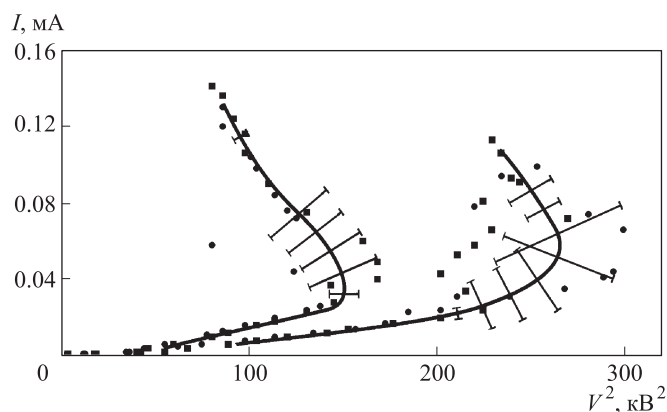


Рис. 4. Вольт-квадрат-амперная характеристика коронного разряда над жидкостью при положительном напряжении на верхнем электроде. Прямоугольная диэлектрическая кювета. Глубина жидкости 20 мм. Высота до верхнего электрода от поверхности жидкости 7 мм (1) и 12 мм (2). Квадратные точки — повышение напряжения, круглые — снижение напряжения на верхнем электроде

в промежуточный режим, а в случае расположения верхнего электрода на высоте 12 мм над жидкостью — при напряжении ~ 15 кВ. На рис. 4 этот переход находится в области перегиба аппроксимирующей кривой. Измерения вольт-квадрат-амперных характеристик в промежуточном режиме характеризуются большой погрешностью вследствие дрожания жидкости. При этом геометрия разряда изменяется, и поэтому для промежуточного режима характерна частая смена режима коронного разряда на дуговой и обратно. При дальнейшем увеличении приложенного напряжения разряд окончательно переходит в режим дугового разряда.

3. Эксперименты с разрядами над поверхностью дистиллированной воды

Использованная дистиллированная вода была получена стандартным образом в ионообменной колонке, ее параметры также были измерены с помощью тест-полосок Tetra: общая жесткость $dGH = 0.0 \pm 1.5^\circ$, карбонатная жесткость $dKH = 0 \pm 2^\circ$, уровень $pH < 6.4$.

Эксперименты с дистиллятом воды были проведены в кюветах круглой металлической и круглой диэлектрической кюветах в нормальных условиях. На рис. 5 представлена вольт-квадрат-амперная характеристика для отрицательной полярности верхнего электрода над поверхностью жидкости. При значении напряжения 5 кВ на поверхности жидкости появлялась воронка как при положительной, так и при отрицательной полярности верхнего электрода.

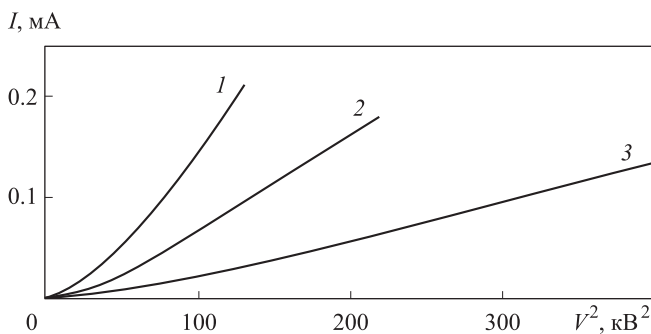


Рис. 5. Вольт-квадрат-амперная характеристика коронного разряда над дистиллированной водой при положительном напряжении на верхнем электроде. Круглая металлическая кювета. Глубина жидкости 20 мм. Высота до верхнего электрода от поверхности жидкости 5 мм (1), 7 мм (2) и 12 мм (3)

При значении напряжения выше 37 кВ наблюдалось появление тонких струек, бьющих вверх из краев воронки. Однако в этом режиме провести подробных исследований не удалось из-за быстрого развития дугового разряда.

4. Эксперименты с разрядами над поверхностью спирта

Проделанные эксперименты со спиртом показывают, что под действием положительной или отрицательной короны на поверхности спирта в металлической или пластмассовой кювете появляются воронки. Во всех рассматриваемых режимах они образовывались при

напряжении на верхнем электроде выше 5 кВ. Как в пластмассовой, так и металлической кюветах появление воронки происходило при положении верхнего электрода над поверхностью спирта на высоте 15 мм.

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) (рис. 6). Его основание вращается по краю воронки то по направлению часовой стрелки, то против нее. Часто (при положении верхнего электрода на высоте 7 мм и приложенном напряжении 23 кВ) столбики образуются на краю воронки, они то появляются, то исчезают или разбиваются на мелкие струйки, как это показано на рис. 7. При повышении напряжения можно наблюдать появление столбика. Аналогичные явления [6] известны в электродинамике заряженной жидкости, однако в коронном разряде они нами наблюдались впервые, их появление не обсуждалось в известной авторам литературе о коронных разрядах.

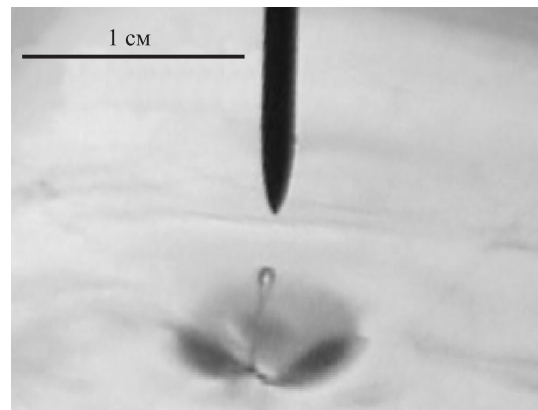


Рис. 6. Появление столбика на поверхности спирта, пластмассовая кювета, расстояние между верхним электродом и поверхностью жидкости 7 мм. Отрицательная корона

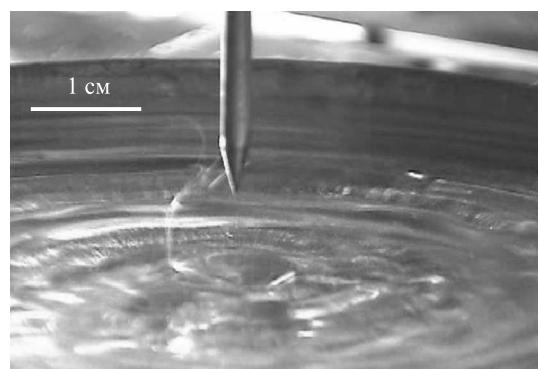


Рис. 7. Разбивающийся столбик на поверхности спирта. Металлическая кювета, расстояние между верхним электродом и поверхностью жидкости 11 мм. Отрицательная корона

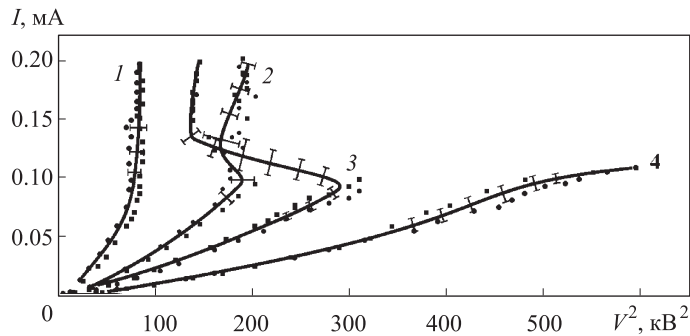


Рис. 8. Вольт-квадрат-амперная характеристика коронного разряда над поверхностью спирта при отрицательном напряжении на верхнем электроде. Диэлектрическая кювета. Глубина жидкости 12 мм, расстояние от поверхности жидкости до верхнего электрода 5 мм (1), 7 мм (2), 11 мм (3) и 15 мм (4). Квадратные точки соответствуют повышению напряжения на верхнем электроде, круглые — понижению

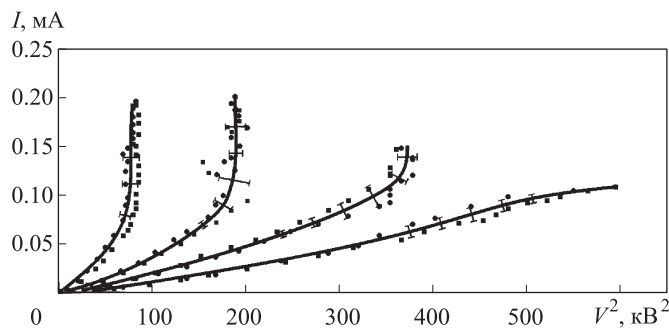


Рис. 9. Вольт-квадрат-амперная характеристика коронного разряда над поверхностью спирта при отрицательном напряжении на верхнем электроде. Металлическая кювета. Глубина жидкости 12 мм, расстояние от поверхности жидкости до верхнего электрода 5 мм (1), 7 мм (2), 11 мм (3) и 15 мм (4). Квадратные точки соответствуют повышению напряжения на верхнем электроде, круглые — понижению

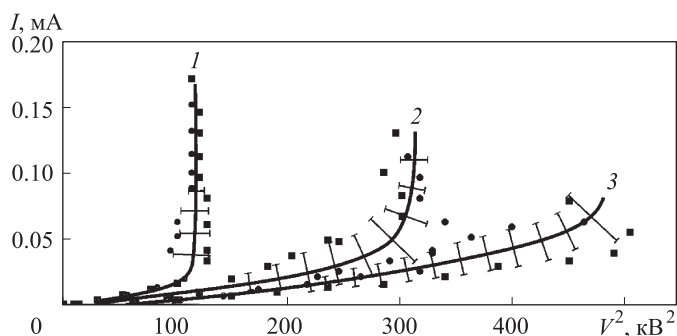


Рис. 10. Вольт-квадрат-амперная характеристика коронного разряда над поверхностью спирта при положительном напряжении на верхнем электроде. Диэлектрическая кювета. Глубина жидкости 12 мм, расстояние от поверхности жидкости до верхнего электрода: 5 мм (1), 11 мм (2) и 15 мм (3). Квадратные точки соответствуют повышению напряжения на верхнем электроде, круглые — понижению

На рис. 8 представлены вольт-квадрат-амперные характеристики коронного разряда над поверхностью спирта, помещенного в пластмассовую кювету при отрицательном напряжении на верхнем электроде, а на рис. 9 представлены вольт-квадрат-амперные характеристики для металлической кюветы. Разбиение столбика на струи и капли — процесс очень быстрый (время порядка одного кадра цифровой видеокамеры, т. е. около 1/25 с). Внешне это проявляется как возникновение брызг.

На рис. 10 представлены вольт-квадрат-амперные характеристики коронного разряда над поверхностью спирта, помещенного в пластмассовую кювету при подаче на верхний электрод напряжения положительной полярности при положении верхнего электрода на высоте 12 мм над поверхностью жидкости. Следует отметить, что появление столбиков, струй и капель наблюдается только в случае отрицательной полярности верхнего электрода.

При положительной полярности верхнего электрода во всех экспериментах при напряжении на верхнем электроде выше 5 кВ наблюдалось появление воронки на поверхности жидкости, а при напряжении выше 20 кВ появлялись пробои между верхним электродом и поверхностью жидкости.

5. Эксперименты со смесями спирта с водой, с глицерином и в чистом глицерине

Аналогичные эксперименты были проведены в глицерине, в смесях спирта с водой и с глицерином. При отрицательной полярности верхнего электрода в экспериментах с диэлектрической кюветой при расположении верхнего электрода над глицерином на высоте 5 мм воронка появлялась при напряжении выше 5 кВ. При расположении верхнего электрода на высоте 10 мм над поверхностью глицерина воронка появлялась при напряжении на верхнем электроде 6 кВ. При этом образовывалось углубление в виде воронки диаметром 3 мм. При расположении верхнего электрода на высоте 15 мм углубление в виде воронки появлялось при напряжении на верхнем электроде выше 7 кВ, его диаметр 4.5 мм.

Эксперименты проводились с глицерином в диэлектрической кювете и при подаче на верхний электрод напряжения положительной полярности. При напряжении на верхнем электроде 20 кВ и высоте электрода над поверхностью жидкости 15 мм происходил переход разряда в дуговой режим. При напряжении на верхнем электроде выше 7 кВ появлялось углубление на поверхности жидкости в виде воронки.

Были проведены аналогичные эксперименты со смесями спирта и глицерина (массовая доля глицерина варьировалась в диапазоне 10–20%), при этом при достаточно высоких напряжениях на верхнем электроде наблюдалось появление мелких струек.

Эксперименты проводились и в смеси спирта с водой с различными массовыми долями спирта и воды: 3:1, 3:4, 2:1, 4:5, 2:3. Во всех экспериментах данной серии на поверхности жидкости появлялись столбики и струйки под действием коронного разряда. В частности, в смеси с отношением спирта и воды 2:1 появление столбиков происходило при напряжении на верхнем

электроре 21 кВ при расположении верхнего электрода над поверхностью жидкости на высоте 7 мм.

В экспериментах с бидистиллятом при подаче на верхний электрод напряжения 39 кВ из поверхности жидкости появлялись мелкие струйки при положении верхнего электрода над поверхностью жидкости 7 мм.

Были также проведены эксперименты со смесью водного бидистиллята со спиртом, при этом массовое соотношение компонент в смеси составляло 4:1. Было установлено, что при напряжении 20 кВ на верхнем электроде из поверхности жидкости также появлялись струйки.

6. Эксперименты с разрядами над поверхностью спирта в случае двух электродов

Эксперименты со спиртом проводились в двухэлектродной конструкции в диэлектрической кювете при глубине жидкости 14 мм. При этом электроды были расположены на высоте 10 мм над поверхностью жидкости. Расстояние между электродами составляло 10 мм. Воронка на поверхности жидкости появлялась при приложенном напряжении выше 5 кВ (рис. 11), а при напряжении выше 27 кВ появлялся столбик жидкости, как это показано на рис. 12. Столбик появлялся либо под одним, либо под другим электродом, эта картина менялась во времени случайным образом. Вольт-квадрант-амперная характеристика этого эксперимента приведена на рис. 13.

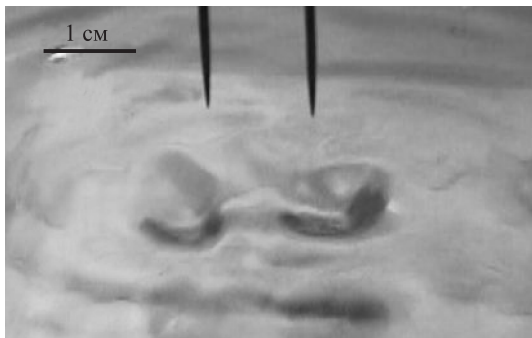


Рис. 11. Воронки на поверхности спирта в двухэлектродной конфигурации

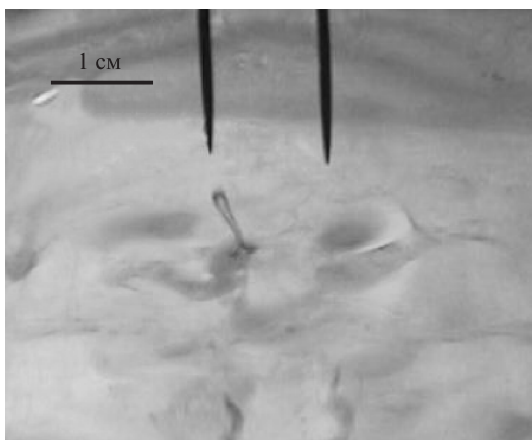


Рис. 12. Столбик на поверхности спирта в двухэлектродной конфигурации

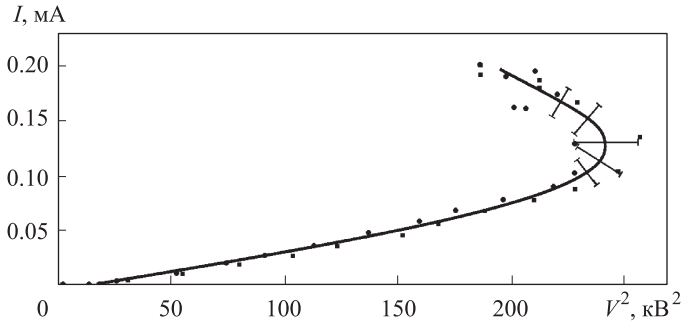


Рис. 13. Вольт-квадрант-амперная характеристика коронного разряда над поверхностью спирта при отрицательном напряжении на верхнем электроде. Диэлектрическая кювета. Глубина жидкости 12 мм, высота до верхних электродов от поверхности жидкости 10 мм. Квадратные точки соответствуют повышению напряжения на верхнем электроде, круглые — понижению

7. Эксперименты с разрядами над поверхностью спирта в случае четырех электродов

Эксперименты проводились в диэлектрической кювете. Исследуемая жидкость была налита в кювету, а электроды находились над ней под углом 45° к поверхности жидкости на расстоянии 5–15 мм от ее поверхности. Эксперименты показали, что как при положительном, так и отрицательном напряжениях на верхних электродах под ними на поверхности жидкости появляются воронки, движение которых имеет сложную форму (рис. 14, а). Напряжение между электродами и поверхностью жидкости варьировалось в диапазоне 3–30 кВ, а ток изменялся в пределах 5–200 мА.

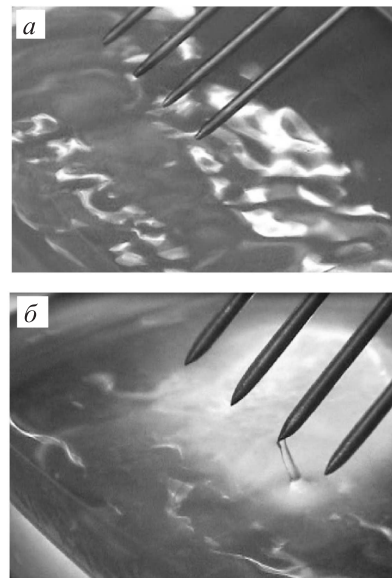


Рис. 14. Коронный разряд над поверхностью спирта в случае четырех электродов: а — воронки под электродами, б — появление столбика под электродом

На рис. 14,б показано появление столбика над поверхностью спирта в случае коронного разряда на четырех электродах при подаче на них отрицательного напряжения. Столбик появляется лишь под одним из четырех электродов, при этом под остальными электродами воронки исчезают. Это указывает на самостоятельное выключение трех электродов из цепи. В экспериментах не было обнаружено условий для появления столбиков под несколькими электродами.

8. Обсуждение полученных результатов

Рассмотрим влияние ионного ветра на поверхность жидкости и предположим, что наблюдаемая воронка создается именно ионным ветром, реализация которого в коронном разряде хорошо известна [4, 5]. Схема коронного разряда и жидкости, находящейся под ним, представлена на рис. 15.

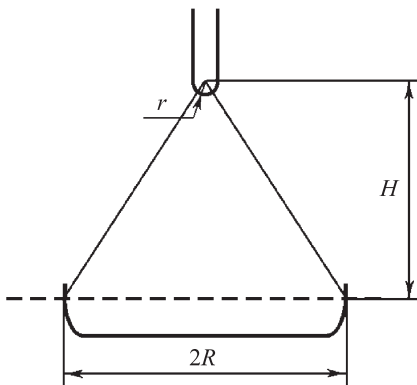


Рис. 15. Схема воздействия ионного ветра на поверхность жидкости

Рассмотрим простейшую модель данного явления. Пренебрегая нагревом воздуха коронным разрядом, из уравнения Эйлера для скорости воздушного потока можно получить следующее уравнение [7]:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) = e E n_{\text{ion}} = \frac{I}{\mu_{\text{ion}} A(x)}, \quad (1)$$

где ρ — плотность воздуха, e — заряд электрона, n_{ion} — концентрация ионов, E — электрическое поле, μ_{ion} — подвижность ионов, I — ток разряда, $A(x)$ — поперечное сечение воздушного потока на расстоянии x от конца верхнего электрода. Аппроксимируем область ионного ветра конусом с радиусом основания R_s , при этом мы считаем, что поверхность конуса касается основания полушария острия электрода радиуса r_0 , как это показано на рисунке.

Используя рис. 15, можно получить следующую формулу для давления, создаваемого ионным ветром:

$$\Delta p = \frac{\rho u^2}{2} \approx \frac{I(R-r)^2}{\mu_{\text{ion}} \pi H r R}. \quad (2)$$

Подставляя в (2) плотность воздуха $\rho = 1.2 \text{ кг/м}^3$, экспериментальное значение силы тока $I = 50 \text{ мкА}$, радиус воронки $R = 2 \text{ мм}$, радиус заострения верхнего электрода $r = 0.4 \text{ мм}$, значение подвижности ионов $\mu_{\text{ion}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ [8], расстояние между острием и поверхностью жидкости $H = 7 \text{ мм}$, получаем

следующее значение для величины средней скорости в условиях нашего эксперимента: $u \approx 7 \text{ м/с}$, что находится в разумном согласии с измерениями [8, 9], где величины скорости ионного ветра на больших расстояниях между электродами составляли 3–5 м/с. Давление, создаваемое ионным ветром согласно формуле (2), оказывается равным $\Delta p \approx 36 \text{ Па}$.

С другой стороны, перепад давления можно найти, используя значения объема вытесненной жидкости при формировании воронки:

$$\Delta p = \frac{\rho g h S}{S} = \rho g h,$$

где h — глубина воронки, S — площадь ее основания. В случае экспериментов с водой $h \approx 3 \text{ мм}$, и $\Delta p \approx 30 \text{ Па}$, что также находится в разумном согласии с оценкой на основе рассмотрения воздействия ионного ветра. Таким образом, можно считать, что в наших экспериментах воронка создается ионным ветром.

Как следует из анализа известной литературы, появление углублений типа воронок под действием коронного разряда над поверхностью жидкости ранее никем не было отмечено.

Рассмотрим теперь причину возникновения струй и столбиков из краев воронки в случае спирта и спиртовых смесей, а также причину их разрушения. Согласно [3], между острием параболической формы с радиусом закругления r и перпендикулярной плоскостью на расстоянии d поле E_{max} на расстоянии x от конца острия вдоль продолжения его оси при приложении напряжения V между электродом и поверхностью выражается по формуле

$$E_{\text{max}} = \frac{2V}{(2x+r) \ln(2d/r+1)}. \quad (3)$$

Электрическое поле в коронном разряде может быть выражено по этой формуле [3], когда нет дугового канала.

Видно, что электрическое поле влияет на заряженную поверхность жидкости. Оно притягивает поверхность жидкости вверх против сил тяжести и поверхностного натяжения, а движение волн на поверхности жидкости вызывает развитие электростатической неустойчивости. Это так называемая неустойчивость Тонкса–Френкеля на поверхности заряженной жидкости. Условие реализации этой неустойчивости [10]

$$E^2 > 2 \frac{\sqrt{\rho g \alpha}}{\varepsilon \varepsilon_0},$$

где E — напряженность электрического поля вблизи поверхности жидкости, ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, ε — диэлектрическая проницаемость жидкости, α — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, ρ — ее плотность. По этой формуле можно получить пороги неустойчивости Тонкса–Френкеля относительно величины электрического поля для разных жидкостей. Оценки соответствующих критических электрических полей представлены в таблице.

Из таблицы видно, что пороги неустойчивости для глицерина и дистиллированной воды близки к значению пробойного поля в воздухе $E \approx 23\text{--}26 \text{ кВ/см}$. Для спирта это значение гораздо ниже: $E \approx 17 \text{ кВ/см}$. Отсюда следует, что образование плазменного канала,

Значения критических электрических полей неустойчивости Тонкса–Френкеля для различных жидкостей

Жидкость	Дистиллированная вода	Спирт	Глицерин	Керосин
E , кВ/см	24	17	25	21

сопровождающееся понижением напряжения на разряде, которое происходит при образовании плазменного канала, может остановить развитие неустойчивости.

На основании формулы (3) и рис. 15 можно понять, почему струи и столбики возникают из краев воронки. Наши наблюдения показывают, что высота края воронки над поверхностью жидкости достигает 1 мм. Из (3) можно получить отношение электрических полей между острием электрода и основанием воронки и между основанием воронки и ее краем

$$\frac{E_{\text{edge}}}{E_{\text{bottom}}} \approx 1 + \frac{\Delta s_1 + \Delta s_2}{d},$$

где Δs_1 — глубина воронки и Δs_2 — размер края воронки. Если $\Delta s_1 \approx 1.5$ мм, $\Delta s_2 \approx 1.0$ мм и $d = 7$ мм, то $E_{\text{edge}}/E_{\text{bottom}} \approx 1.35$. Таким образом, условия для развития неустойчивости выполняются на краю воронки значительно лучше, что и показывает эксперимент.

Анализ вольт-квадрат-амперных характеристик и наблюдаемых экспериментальных данных показывает, что струи и столбики в случае отрицательной короны при высоких напряжениях появляются при более высоких напряжениях, чем напряжения, реализующиеся в положительной короне. Так, условия в отрицательной короне, схожие с теми, что реализуются в конденсаторе [3] с большей величиной электрического поля, вызывают развитие неустойчивостей. В положительной короне с меньшей величиной электрического поля эта неустойчивость не развивается.

Появление распадающихся струй и разрушающихся столбиков может быть связано с неустойчивостью заряженных капель (если рассматривать концы столбиков в виде капель, см. рис. 6). Условия их возникновения можно связать с деформацией поверхности капель под действием поля зарядов [10] и характеризуются неравенствами

$$\frac{\varepsilon_{\text{air}} \varepsilon_0 E^2}{2} \geq 0.7 \frac{\alpha}{R}$$

в случае больших деформаций (задача Релея) и

$$\frac{\varepsilon_{\text{air}} \varepsilon_0 E^2}{2} \geq 2 \frac{\alpha}{R}$$

в случае малых деформаций, где E — напряженность электрического поля на поверхности капли, ε_{air} — диэлектрическая проницаемость воздуха, α — коэффициент поверхностного натяжения, R — радиус капли. Полагая, что в случае спирта радиус капли равен радиусу столбика, получаем $E \geq 26\text{--}45$ кВ/см у поверхности кончика. Это указывает на увеличение плотности поверхностного заряда на кончике столбика,

а электростатическое расталкивание зарядов и приводит к его разрушению, что аналогично механизму, рассмотренному в работе [11].

Заключение

В работе проведены исследования коронных разрядов положительной и отрицательной полярности над поверхностью водопроводной и дистиллированной воды, спирта, глицерина, смесями спирта с водой и глицерином. Для удобства анализа построены вольт-квадрат-амперные характеристики этих разрядов, показывающих три режима существования разряда, которые можно назвать: нормальный коронный разряд, переходный и дуговой разряд. Впервые показано, что во всех режимах наблюдается образование углублений типа воронки на поверхности жидкости под верхним электродом, которая образуется в результате действия ионного ветра.

Впервые обнаружены развитие реализации различного типа электростатических неустойчивостей на поверхности жидкости, находящейся под действием коронного разряда. К ним можно отнести появление жидких столбиков и распадающихся струй. Возникновение столбиков происходит из края воронки, образующейся на поверхности жидкости под действием ионного ветра, образованного коронным разрядом. В случае спирта, глицерина, дистиллированной воды и их смесей появление столбиков и струй происходит при отрицательно полярности верхнего электрода. Это связано с тем, что в отрицательной короне над поверхностью жидкости могут реализовываться более высокие значения напряжения между верхним электродом и поверхностью жидкости, чем в случае положительной короны. Показано, что подобные столбики и воронки появляются также и в случае многоэлектродных конструкций в коронном разряде над поверхностью спирта.

Список литературы

1. Аристова Н.А., Пискарев И.М. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. XI-5. Прикладная химия плазмы. М., 2006.
2. Plante G. Electrical Phenomena in the Atmosphere. Paris, 1891.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М., 1992.
4. <http://tetra.de>.
5. Loeb L.B. Electrical Coronas. Berkeley, 1965.
6. Stuetzer O.M. // J. Appl. Phys. 1959. **30**. P. 984.
7. Саранин В.А. Устойчивость равновесия, зарядка, конвекция и взаимодействие жидких масс в электрических полях. М.–Ижевск, 2009.
8. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М., 1959.
9. Lacoste D.A., Pai D., Laux C.O. AIAA-2004-354 // 42-nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 5–8 January 2004. Reno, Nevada.
10. Козлов Б.А., Соловьев В.И. // ЖТФ. 2007. **77**, № 7. С. 70.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М., 1982.
12. Френкель Я.И. На заре новой физики. Л., 1970. С. 238.

Electrohydrodynamic features of the interaction of corona discharge with the liquid surface**A. F. Aleksandrov, V. L. Bychkov^a, D. V. Bychkov, S. A. Volkov, A. A. Kostiuk, V. A. Chernikov***Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: ^abychvl@orc.ru.*

The present work is devoted to the experimental research of the corona discharge over a surface of following liquids: water and distilled water, alcohol, glycerin, mixtures of alcohol with water and glycerin. One of electrodes was over a liquid surface, and another has been dipped in it. Three modes of existence of the discharge over a liquid surface have been obtained: a usual corona, a transitive a mode and a mode of the arc discharge. In these modes on a liquid surface at discharge action occurrence of deepening in the form of a funnel, and also streams and the scattered streams directed towards the top electrode is observed. The qualitative model of formation of a funnel on a surface of a liquid under the influence of the ion wind created by the corona discharge is presented. Occurrence of streams and scattered streams is connected with development of Tonks–Frenkel and Raleigh instabilities.

Keywords: corona discharge, surface of a liquid, water, ion wind.

PACS: 52.80.Hc, 47.65.-d.

Received 9 December 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2011).

Сведения об авторах

1. Александров Андрей Федорович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-25-74, e-mail: alex@pelc60-1.phys.msu.ru.
2. Бычков Владимир Львович — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр; e-mail: bychvl@orc.ru.
3. Бычков Дмитрий Владимирович — научный сотрудник.
4. Костюк Андрей Алексеевич — аспирант.
5. Черников Владимир Антонович — канд. физ.-мат. наук, доцент.
6. Волков Сергей Александрович — студент.