

УДК 533.9.082.5.
 EDN: FEBHNA

PACS: 52.25.Dg.



Явления в коронном разряде над жидкими электродами

*В. Л. Бычков, Д. Е. Сороковых, П. А. Горячкин,
Д. В. Бычков, В. А. Черников*

Приведены данные по экспериментам с разрядами над жидкостями такими, как вода, спирт, глицерин и их смесями. Разряды развивались под верхним электродом в виде иглы, или набора игл. В качестве нижнего электрода использовалась кювета, заполненная веществом, к которой подводилось заземление. Во всех случаях в жидкости под верхним электродом на поверхности вещества возникает воронка, или волны, что свидетельствует о влиянии ионного ветра на поверхностный слой. В случае дистиллированной воды, спирта, смесей спирта с водой и спирта с глицерином на поверхности жидкости под верхним электродом появляются струи и фонтаны, в случае керосина – волны по его поверхности и пузырьки внутри жидкости. Появление струй и их разрушение на капли отражают развитие гидродинамических явлений над заряженными жидкостями. Приведена попытка качественной интерпретации результатов наблюдений, проведены полукачественные оценки.

Ключевые слова: коронный разряд, дисперсные материалы, электрогидродинамические явления, ионный ветер, структуры, плазма.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-22-31

Введение

Интерес к плазменным воздействиям на поверхность различных материалов в воздухе носит практический характер [1, 2]. Применение таких разрядов связано с обеззараживанием воздуха [1], жидкостей [3–5], зерна [6], изменением свойств жидкости – её проводимости, химического состава, генерацией в ней активных частиц [1, 5–7].

Следует отметить отличие таких разрядов от классического коронного разряда [8–11], заключающееся в наличии нижнего электрода, наполненного веществом, которое нелинейно влияет на протекание тока, изменяет вольтамперные характеристики разряда и состав газа над поверхностью материала.

В работах [12, 13], было показано существование структур над жидкостью (трансформаторное масло и смесь трансформаторного масла с водой) под действием электрического поля, создаваемого между верхним электродом из системы игл и заземленной кюветой. В этих работах также, как и в [3] появлялись макроскопические структуры, которые в [12, 13] рассматривались с точки зрения развития само-организационных процессов.

В данной работе нас интересуют механизмы развития электрогидродинамических особенностей над поверхностью жидкостей материалов в поле действия разрядов, поскольку они реализуются в приповерхностных слоях этих материалов и могут влиять на ре-

Бычков Владимир Львович, с.н.с., доцент, д.ф.-м.н.
E-mail: bychvl@gmail.com

Сороковых Дмитрий Евгеньевич, студент.
E-mail: sorokovykh.de19@physics.msu.ru

Горячкин Павел Алексеевич, аспирант.

Бычков Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н.

Черников Владимир Антонович, к.ф.-м.н., доцент.
Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

Поступила в редакцию 16.11.2022

После доработки 15.12. 2022

Принята к публикации 19.12.2022

© Бычков В. Л., Сороковых Д. Е., Горячкин П. А.,
Бычков Д. В., Черников В. А., 2023

зультаты воздействия. Эта работа является продолжением исследований [3, 5] электрогидродинамических (ЭГД) эффектов, вызываемых разрядами над поверхностью жидкостей и дисперсных материалов.

Мы провели несколько серий экспериментов с положительно и отрицательно заряженными верхними (см. рис. 1) электродами. Ранее [3] (с участием одного из авторов данной статьи) было установлено, что для развития гидродинамических явлений на поверхности жидкости лучше использовать разряд с отрицательно заряженным верхним электродом (для краткости можно назвать его отрицательной короной), поскольку в нем можно реализовать разряд при более высоких напряжениях, чем при положительном верхнем электроде, прежде чем разряд перейдет в искру. Он может стимулировать развитие пондеромоторных сил [14–16] и различных гидродинамических неустойчивостей [14, 16–18], приводящих к образованию воронок, струй или других структур. Следует отметить, что подобные объекты иногда появляются в процессах грозовой активности в виде огней Св. Эльма около металлических острий и заостренных поверхностей [14, 18], а также, так называемой, шаровой молнии со струями, выступами и другими особенностями поверхности [17, 18].

Данная работа посвящена развитию предыдущих исследований электрогидродинамических явлений на поверхности жидкости [3, 5] и пондеромоторным силам, приводящим к таким явлениям.

Постановка экспериментов

Используемый нами разряд представляет собой слаботочный слабосветящийся разряд (кору), возникающий вблизи проводящего верхнего электрода. Он происходит в воздухе при комнатной температуре и атмосферном давлении при напряжении 5–50 кВ между электродами на расстоянии от нескольких миллиметров до сантиметров. С увеличением напряжения корона переходит в искровой или дуговой разряд с образованием ярко светящегося канала. Разряд в воздухе сопровождается так называемым ионным, или электрическим, ветром [2, 3–5].

Приведем упрощенное объяснение этого явления. Электрическое поле на конце электрода имеет большую величину [3]. Появляется плазма. Из закона сохранения количества заряда и большого количества генерируемых заряженных частиц следует, что плазма квазинейтральна. Если острие заряжено положительно, то согласно закону Кулона, отрицательные ионы притягиваются к острию и нейтрализуются на его поверхности положительным зарядом. Положительные ионы отталкиваются от конца электрода и покидают область своего образования. Они перемещаются в электрическом поле электрода дольше, чем отрицательные ионы, которые нейтрализуются на поверхности наконечника. Следовательно, согласно второму закону Ньютона, положительные ионы приобретают больший импульс, чем отрицательные ионы. Некомпенсированный импульс положительных ионов проявляется в виде ветра в направлении от положительно заряженного электрода. Точно так же в случае отрицательно заряженного электрода возникает ионный ветер из отрицательных ионов, направленный от него. Согласно экспериментам [9] и нашим оценкам [3, 5] его скорость составляет около 5–8 м/с.

Рассмотрим какую по размеру области занимают электрон-ионная плазма и область движения ионов в случае разряда в воздухе при атмосферном давлении. В районе электрон-ионной плазмы около высоковольтного (верхнего) электрода кроме ионизации происходят процессы прилипания электронов к молекулам кислорода. Константа скорости трехтельного прилипания k_{att} , имеющего формулу $e + O_2 + O_2 \rightarrow O_2^- + O_2$ (e – электрон, O_2 , O_2^- – молекула и отрицательный ион кислорода) около $k_{att} \sim 10^{-30} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$ [19]. Константа скорости диссоциативного прилипания k_{dis} , имеющего формулу $e + O_2 \rightarrow O^- + O$ около $k_{dis} \sim 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ [20].

Характерное время прилипания по механизмам трехтельного и диссоциативного $\tau_{att} = (N_{O_2}^2 k_{att})^{-1}$ (N_{O_2} – концентрация молекул кислорода) $\tau_{dis} = (N_{O_2} k_{dis})^{-1}$ оказывается около $(2-3) \times 10^{-9} \text{ с}$ когда электроны превращаются в отрицательные ионы. Скорость дрейфа элек-

тронов в этой области около $w \sim 10^5$ м/с [8]. Следовательно, за это время электроны переместятся на расстояние около 3×10^{-4} м. Если учесть, что расстояние между электродами около 10 мм, то можно сказать что область занятая ионами много больше приэлектродной плазменной области.

Итак, область воздействия коронного разряда можно разделить на маленькую область действия плазмы и значительно большую область дрейфа ионов, где электронов нет, и где происходят процессы воздействия ионов и газа на материалы. Это согласуется с работами [10, 11].

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

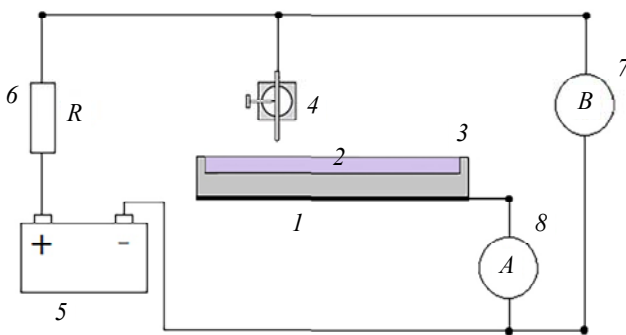


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – кювета, в которую наливается жидкость; 2; 3 – второй электрод (не коронирующий); 4 – первый электрод – коронирующий; 5 – источник высокого напряжения; 6 – R, балластное сопротивление разряда для ограничения тока в цепи разряда; 7 – вольтметр для измерения падения напряжения на разряде; 8 – амперметр для измерения силы тока разряда

Установка состоит из кюветы, заполненной жидкостью (вода, спирт, керосин и др.), и

электрической цепи. Верхний электрод или набор электродов диаметром 0,9 мм (радиус острия 0,2 мм) или 2 мм (радиус острия 0,4 мм) располагался на высоте 5–15 мм над поверхностью жидкости. Электроды находились под положительным или отрицательным потенциалом. Кюветы были металлическими или диэлектрическими. Кюветы металлические имели параметры: цилиндрические – диаметром 130 мм и высотой 18–40 мм, диэлектрические были прямоугольными высотой до 45 мм, шириной до 95 мм и длиной до 140 мм.

Исследуемые жидкость или порошок помещали в кювету, отрицательные или положительные электроды располагали непосредственно над жидкостью, расстояние между электродом и жидкостью можно было изменять в диапазоне 1–30 мм. В качестве источника питания использовался генератор высокого напряжения, он позволял изменять напряжение на электродах от 2 до 50 кВ с шагом 250 В. Возникновение пробоя сопровождалось падением напряжения на разрядном промежутке, которое регистрировалось вольтметром. В этом устройстве мы использовали балластное сопротивление, значение которого составило 60–100 МОм. Типичные значения силы тока составляли 10–800 мкА.

Результаты экспериментов

Результаты большинства проделанных нами экспериментов над поверхностью жидкостей с одиночным электродом представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наблюдение гидродинамических эффектов в условиях отрицательной короны

Вещество	Воронка на поверхности	Колебания поверхности	Струйки и брызги	Столбики	Волны
Спирт этиловый	+	+	+	+	+
Вода водопроводная	+	+	-	-	-
Вода дистиллированная	+	+	+	-	+
Спирт-вода смесь 1:1	+	+	+	+	+
Спирт-глицерин смесь 1:1	+	+	+	+	+
Бутилглицоль	+	+	+	+	+
Глицерин	+	+	-	-	-

Появление воронки под действием движения ионного ветра обсуждалось в [3]. Появление волн на поверхности можно объяснить периодическим воздействием потока ионов. Цилиндрические волны возникали при падении капелек, образующихся при конденсации испаренной при действии разряда жидкости на верхнем электроде. Эти явления аналогичны воздействию падающих капель на поверхность жидкости [21]. Появление брызг и фонтанов с поверхностью струй – можно объяснить разрушением кончика струйки или столбика под действием скопившихся на них одноименных зарядов [3, 13]. Появление струек и столбиков связано с влиянием электрического поля разряда, поскольку интенсивность появления этих структур увеличивается с увеличением приложенного в разряде напряжения.

Ранее предполагалось [3], что появление этих структур связано с развитием неустойчи-

вости Тонкса–Френкеля, условие её реализации описывается выражением (1) см. ниже. Однако появление этих структур при полях меньших, чем полученных на основании формулы (1) приводит к необходимости пересмотреть предположение из [3]. На рис. 2, для примера, представлены фотографии структур над бутилгликолем. На рис. 2а видно, что на краях воронки происходит образование струй (столбиков). На рис. 2б видны два столбика, образовавшиеся на равном расстоянии от конца иглы. В эксперименте они двигались по кругу на равном расстоянии друг от друга и не разрушались во время эксперимента, что говорит об отсутствии неустойчивости. На концах столбиков видны квазисферические утолщения, образующиеся под действием одноименных зарядов на их поверхности. Подобные структуры были получены также в случае спирта и смесей спирта с глицерином.

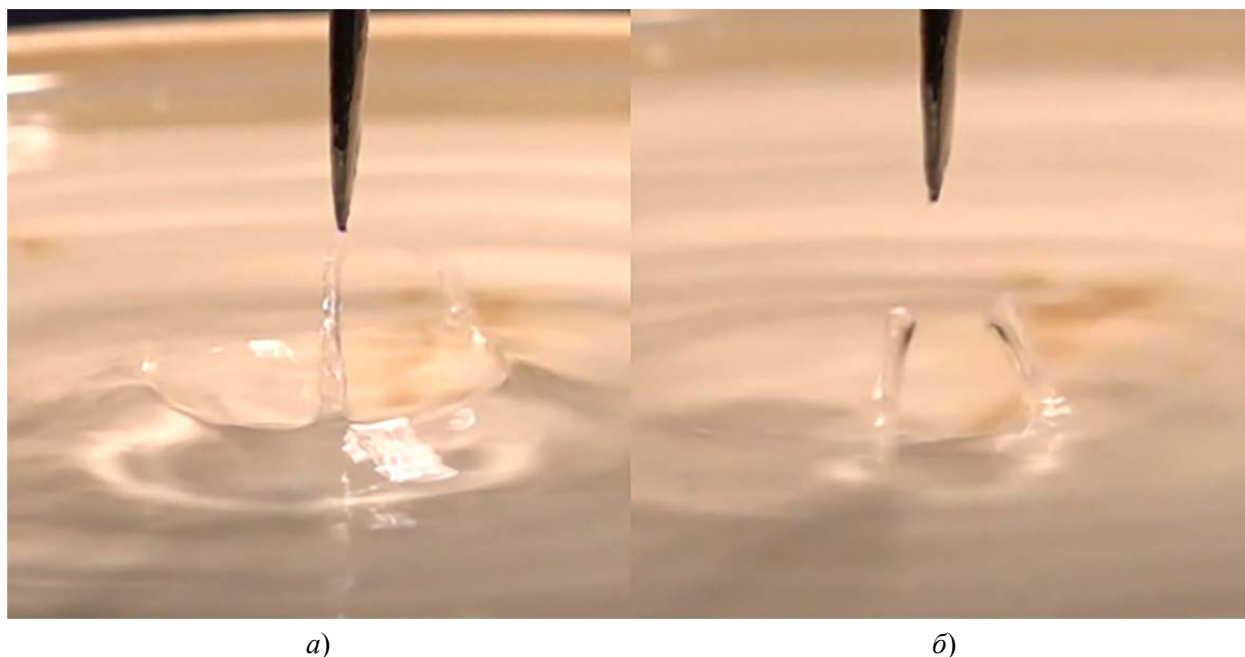


Рис. 2. Столбики, воронка и волны над поверхностью бутилгликоля. Отрицательная корона. Расстояние от конца иглы до поверхности жидкости 7 мм. Напряжение 10 кВ

Рис. 2 наглядно показывает структуры над поверхностью жидкости: столбики, воронки и цилиндрические волны. При этом расширение концов столбиков говорит о действии зарядов, находящихся на столбике, которые собираются в утончениях структуры, раздувают кончик, и могут его разорвать [3, 14]. Это же относится и к механизму появления брызг.

Для исследования характера движения жидкости мы использовали спирт, покрытый

порошком алюминия, смесь глицерина и спирта (1:1) и глицерин с добавлением порошка алюминия. Частицы алюминия в порошке имеют пластинчатую форму и покрыты тонкой оксидной и жировой пленкой. Насыпная плотность порошка $0,15\text{--}0,30\text{ г/см}^3$, содержание активного алюминия 85–93%. Средняя толщина лепестков составляет примерно $0,25\text{--}0,50\text{ мкм}$, а средний линейный размер $20\text{--}30\text{ мкм}$.

На рис. 3 мы демонстрируем воздействие разряда на поверхность спирта, покрытую порошком алюминия. Отметим, что при этом форма нижнего жидкого электрода сильно отличается от плоского в случае классического коронного разряда.



Рис. 3 Возмущение на поверхности спирта, покрытого алюминиевым порошком. Глубина спирта 12 мм, высота верхнего электрода над поверхностью жидкости 7 мм

В условиях отрицательной короны при напряжениях 10–15 кВ наблюдалось образование рельефной поверхности и выдувание алюминиевого порошка из области под острием (рис. 3). Из рисунка видно, что область воздействия, которую можно соотнести с областью действия коронного разряда находится непосредственно под иглой верхнего электрода.

Именно эту область обычно рассматривают при моделировании [3, 5].

Напряжение порядка 19–20 кВ приводит к образованию цилиндрических волн, расходящихся от центра к периферии (рис. 4б).

На рис. 4а видны радиальные следы движения порошка в жидкости. Их можно связать с движением жидкости, развивающимся при нагреве разрядом жидкости в кювете.

С целью исследования нагрева и охлаждения жидкости под действием разряда, нами были проделаны опыты с использованием тепловизора Fluke Tis 10. В табл. 2 представлены результаты измерений температуры поверхности жидкости, комнаты (стен) и электрических параметров разряда. Температура воздуха у поверхности спирта оказалась меньше комнатной. Температура воздуха у поверхности воды и глицерина оказалась практически равной комнатной. Для объяснения этих результатов напомним, что температура кипения глицерина равна 290 °С, воды 100 °С, спирта 78 °С [22]. Измерения тепловизором показывают, что температура поверхности спирта сильно снижалась, что свидетельствует об активном испарении и сдувании пара ионным ветром. Нагрев воды разрядом не приводил к ее значительному испарению. В случае глицерина, нагрев жидкости разрядом был недостаточен для её испарения, однако температуры были относительно высоки, но недостаточны для активного парообразования.



Рис. 4. Воздействие разряда на жидкость, покрытую алюминиевым порошком. а) – смесь спирта и глицерина 1:1, $U = 18,4$ кВ, $I = 96$ мкА, положение иглы над жидкостью $h = 7$ мм; б) – спирт $U = 15,4$ кВ, $I = 81$ мкА, положение иглы над жидкостью $h = 7$ мм

В случае спирта и бутилгликоля над поверхностью происходило парообразование и вынос частиц с поверхности при помощи ионного ветра, поэтому поверхность охлаждалась, концентрация молекул над областью жидкости увеличивалась, изменялась диэлектрическая проницаемость воздушной смеси, и могла реализовываться (возрастать) пондеромоторная сила в неоднородном электрическом поле разряда [14, 15] (см. ниже).

Из таблицы видно, что поверхность спирта сильно охлаждается при действии разряда, поверхность воды охлаждается незначительно, либо не охлаждается. Поверхность глицерина нагревается заметно. Это можно связать с различными коэффициентами испарения жидкостей.

В развитие исследований с разрядом в системе с двумя иглами нами были проделаны эксперименты также по реализации структур. Было подтверждено, что в случае двух верхних электродов (рис. 5) при общем потенциале происходит поочередное образование столбиков под иглками, которые направлены к верхнему электроду (рис. 5а). Эксперименты были проделаны в диэлектрической кювете глубиной 14 мм, когда верхние электроды находились на высоте 15 мм над жидкостью. Расстояние между электродами составляло 11 мм.

Структуры появлялись при напряжениях выше 7 кВ. Устойчивое попеременное появление структур прекращалось при повышении приложенного напряжения, когда появлялись струи бьющие из краев воронок, образованных в жидкости ионным ветром (рис. 5б).

Таблица 2

Электрические параметры разряда и окружающего воздуха и поверхности жидкости в условиях отрицательной короны. $H = 5$ мм

Вещество	U , кВ	I , мкА	T_{room} , °C	T_{liq} , °C
Спирт этиловый	$7,0 \pm 0,1$	40 ± 5	22 ± 1	15 ± 1
	$9,0 \pm 0,1$	150 ± 20	22 ± 1	$13,0 \pm 0,5$
Вода водопроводная	$8,4 \pm 0,1$	100 ± 13	22 ± 1	$19,5 \pm 1$
	$10,0 \pm 0,1$	170 ± 21	$22,5 \pm 1$	$22,5 \pm 1$
Глицерин	$9,9 \pm 0,1$	160 ± 20	23 ± 1	28 ± 1
	$14,7 \pm 0,1$	475 ± 60	$22,5 \pm 1$	31 ± 1

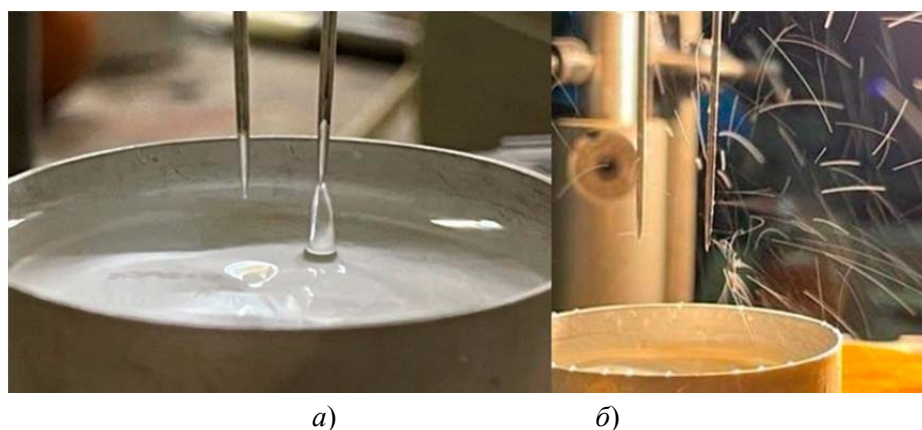


Рис. 5. Появление столбиков и струй из поверхности жидкости при разряде с двумя иглками над спиртом

Обсуждение полученных результатов

Как известно [14, 15] электрическое поле влияет на поведение заряженной поверхности жидкости, оно притягивает поверхность жид-

кости против сил тяжести и поверхностного натяжения, при этом движение возмущенной поверхности жидкости в однородном электрическом поле вызывает развитие электростатических неустойчивостей. Под действием од-

нородного сильного поля над заряженной жидкостью наблюдается неустойчивость Тонкса – Френкеля, которая реализуется при выполнении условия [14, 18] для однородного электрического поля

$$E^2 > \frac{2\sqrt{\rho g \alpha}}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (1)$$

где E напряженность электрического поля у поверхности жидкости, ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, ε – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха, α – поверхностное натяжение жидкости, ρ ее плотность. Оценки напряженности электрического поля, полученные на основе формулы (1) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Критические значения электрического поля для развития неустойчивости Тонкса–Френкеля

Жидкость	Дистиллированная вода	Спирт	Глицерин	Керосин
E , кВ/см	24	18	24	19

Казалось бы, именно эта неустойчивость может объяснить появление столбиков, однако наши эксперименты с порошком из Al_2O_3 показывают, что предположение о развитии неустойчивости Тонкса–Френкеля не имеет место, поскольку последняя реализуется в случае жидкой однородно заряженной поверхности, а не в сыпучей, как у нас. В случае нашего разряда электрическое поле под иглой сильно неоднородно (рис. 3), что не совпадает с условием развития этой неустойчивости. Кроме того, величины электрического поля, необходимого для развития неустойчивости Тонкса–Френкеля требуют реализации почти пробойных высоких электрических полей, когда разряд переходит в искру [3]. В наших экспериментах электрические поля в случае спирта были меньше на порядок величины, чем по формуле (1). Используя тот факт, что электрическое поле нашего разряда близко к полю коронного разряда в центре кюветы воспользуемся результатами [8] для дальнейших оценок. Электрическое поле E_{max} на расстоянии x между концом иглы параболической формы с радиусом кривизны r и перпендикулярной плоскостью на расстоянии d от нее связано с напряжением V между острием и плоскостью, и выражается как:

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

Этой формулой можно описать электрическое поле в разряде, когда нет развитого плазменного канала между иглой и поверхностью. Поэтому можно прибегнуть к объясне-

нию полученных результатов при помощи рассмотрения возникающей пондеромоторной силы. Применение формулы (2) из электростатики возможно, когда электрическое поле, создаваемое иглой много больше поля объемного электрического заряда. В условиях коронного разряда это выполняется. Так в расчетной работе [11] показано, что вблизи иглы в коронном разряде при близких к нашим условиям напряженность поля порядка 5×10^5 В/см, а в остальной части объема порядка 120 В/см. Т. е. поле иглы много больше поля объемного заряда, поэтому можно пользоваться формулой (2) из электростатики. Кроме того, согласно [23] полем объемного заряда в коронном разряде можно пренебречь. Как известно [14, 15], на образец диэлектрика, помещенный в неоднородное электрическое поле, действует пондеромоторная сила, объемная плотность которой описывается формулой

$$\mathbf{f} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 - \varepsilon_0}{2} \text{grad } E^2 \quad (3)$$

где ε_1 , ε_0 – соответственно диэлектрическая проницаемость диэлектрического образца и воздуха соответственно. Из формулы (3) видно, что направление силы, действующей на диэлектрик, не зависит от направления поля; она всегда направлена на максимальное увеличение напряженности электрического поля. В этом случае диэлектрик уносится в область наибольшей напряженности электрического поля.

Оценим значение этой силы для спирта (который по всем характеристикам также бли-

зок к бутилгликолю [22]) и частиц глины в воздухе под действием пондеромоторной силы. Величина градиента квадрата электрического поля от иглы коронного разряда, рассчитанная из (2), вдоль направления x , совпадающего с направлением иглы, равна:

$$\frac{\partial}{\partial x} E_{\max}^2 = -\frac{16V^2 x}{\ln^2(2d/r+1)(2x+r)^3}. \quad (4)$$

В соответствии с данными эксперимента, имеем $d = 8$ мм расстояние между электродами, $r = 0,4$ мм радиус кривизны кончика иглы, $x = 5$ мм, $V = 10$ кВ, для спирта $\epsilon_1 \approx 26$. Тогда из уравнений (2) и (3), мы получим плотность силы для спирта $5,7 \times 10^3$ Н/м³. Это означает, что для спирта, такая сила может уравновесить «спирт» с плотностью 570 кг/м³ (при плотности спирта 800 кг/м³). Наряду с пондеромоторными силами действует электростатическая сила притяжения, обусловленная наличием поверхностного заряда противоположного игле знака. Об этом свидетельствовало слабое свечение, реализуемое на кончике столбика в некоторых наших опытах.

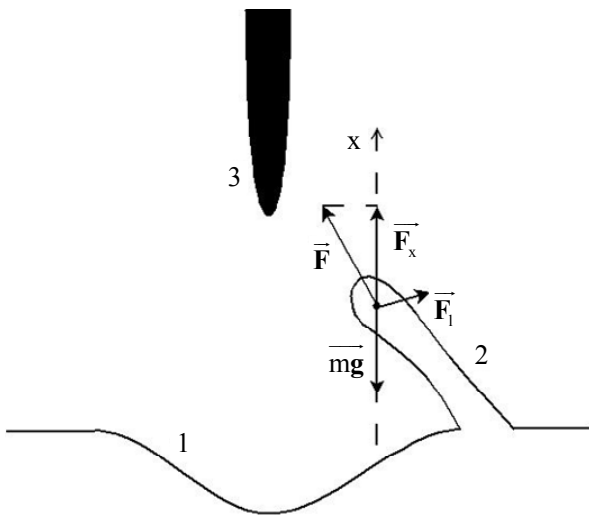


Рис. 6. К объяснению кратковременной стабилизации столбиков

Как видно (рис. 6), столбик растет из края воронки под углом к оси иглы. На столбик действует сила тяжести, mg , пондеромоторная сила по направлению градиента напряженности электрического поля и сила электростатического притяжения, F , сила давления ионного ветра, F_1 . По мере роста столбик искривляется, и проекция пондеромоторной и кулоновской

силы на вертикальную ось уменьшается F_x . В некоторый момент времени они могут уравновесить силу тяжести. При этом накопившийся на вершине столбика электрический заряд приводит к разрушению конца столбика и вылету брызг, уменьшающих заряд структуры и соответственно кулоновскую силу.

Таким образом, в случае спирта реализующейся пондеромоторной силы достаточно для того, чтобы уравновесить частицы спирта, и обусловить их движение с образованием столбиков. В случае спирта или бутилгликоля после образования столбиков их заряженные кончики могут разрушаться на капли см. выше и [3].

Заключение

В работе исследовано воздействие разряда на поверхность жидкого электрода разного состава.

Показано, что гидродинамические структуры в виде столбиков появляются при воздействии пондеромоторной силы, возникающей в неоднородном поле разряда при наличии мелких компонентов жидкости в воздухе.

Результаты экспериментов показывают, что коронным разрядом энергия в жидкость вводится неравномерно, и приводит к нагреву или охлаждению материала. Этот эффект надо учитывать в приложении данного разряда к воздействию на почву, зерно и зеленые растения [5–7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Прикладная химия плазмы. Т. 9-5 / под ред. Лебедева Ю. А., Плате Н. А., Фортова В. Е. – М.: «Янус-К», 2008.
2. Остроумов Г. А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. – М.: Наука, 1979.
3. Александров А. Ф., Бычков В. Л., Бычков Д. В., Волков С. А. и др. / Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2011. № 4. С. 67.
4. Panov V. A., Pecherkin V. Y., Vasilyak L. M. et al. / Plasma Phys. Rep. 2021. Vol. 47. P. 623.
5. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Doshko K. I., Zaitsev F. S. et al. / IEEE Trans Plasma Sci. 2021. Vol. 49. № 3. P. 1028.
6. Bychkov V. L., Bikmukhametova A. R., Chernikov V. A., Doshko K. I. et al. / IEEE Trans on Plasma Sci. 2020. Vol. 48. № 2. P. 350.

7. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., Zaitsev F. S. et al. / IEEE Trans Plasma Sci. 2021. Vol. 49. № 3. P. 1034.
8. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – Долгопрудный: Интеллект, 2009.
9. Козлов Б. А., Соловьев В. И. / ЖТФ. 2007. Т. 77. № 7. С. 70.
10. Eichwald O., Guntoro N. A., Yousfi M., Benheni M. / J. Physics D: Applied Physics. 2002. Vol. 35. P. 439.
11. Lacoste D. A., Pai D. Z., Laux C. O. / Proc. 42nd AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. – USA: Reno, Nevada, 2004. P. AIAA-2004-354.
12. Семенов В. К. / Вестник ИГЭУ. 2013. № 5. С. 69.
13. Семенов В. К. / Вестник ИГЭУ. 2013. № 6. С. 105.
14. Ландау Л. Д., Lifshits E. M. Электродинамика сплошных сред. – М.: Физматгиз, 1959.
15. Матвеев А. Н. Электродинамика. – М.: Высшая школа, 1980.
16. Ширяева С. О., Григорьев А. И. Методы расчета критических условий электрогидродинамических неустойчивостей: учеб. пособие. – Ярославль: Ярославский гос. ун-т, 1996.
17. Григорьев А. И. Шаровая молния. – Ярославль: Ярославский гос. ун-т, 2006.
18. Саранин В. А., Иванов Ю. В. Равновесие жидкостей и его устойчивость. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009.
19. Ширяева С. О., Григорьев А. И., Орлова К. И. / Электронная обработка материалов. 2018. Т. 54. С. 41.
20. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Volkov S. A. et al. / Rus. J. Phys. Chem. 2015. Vol. B9. P. 807.
21. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Kosmachevskii K. V. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2017. Vol. 45. P. 3118.
22. Физические величины: справочник / под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
23. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. – М.: Гостехиздат, 1947.

PACS: 52.25.Dg.

Electrohydrodynamic phenomena in discharges over liquid and dispersed electrodes

V. L. Bychkov, D. E. Sorokovykh, P. A. Goryachkin, D. V. Bychkov and V. A. Chernikov

Physical Department of Lomonosov Moscow State University
Bld. 2, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: bychvl@gmail.com

Received 16.11.2022; revised 15.12.2022; accepted 19.12.2022

The paper presents data on experiments with discharges over liquids such as water, alcohol, glycerin and their mixtures. Discharges developed under the upper electrode in the form of a needle, or a set of needles. A cuvette filled with a substance was used as the lower electrode, to which grounding was applied. In all cases, a funnel or waves appear in the liquid under the upper electrode on the surface of the substance, which indicates the influence of the ion wind on the surface layer. In the case of mixtures of distilled water, alcohol, alcohol with water and alcohol with glycerin, jets and fountains appear on the surface of the liquid under the upper electrode, in the case of kerosene, waves along its surface and bubbles inside the liquid. The appearance of jets and their destruction into droplets reflect the development of hydrodynamic phenomena over charged liquids. With the help of a thermal imager, measurements of the surface temperature of the liquid were carried out. A qualitative interpretation of the results is given.

Keywords: corona discharge, liquid electrodes, water, alcohol, electrohydrodynamic phenomena, ion wind, columns, plasma.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-22-31

REFERENCES

1. Encyclopedia of low temperature plasma. Applied Plasma Chemistry. Ed. Yu. A. Lebedev, N. A. Plate and V. E. Fortov, Moscow, Yahys-K, **9-5**, 2008 [in Russian].
2. Ostroumov G. A., Interaction of electric and hydrodynamic fields, Moscow, Nauka, 1979 [in Russian].
3. Alexandrov A. F., Bychkov V. L., Bychkov D. V., Volkov S. A. et al., Moscow University Physics Bulletin **66**, 67 (2011).
4. Panov V. A., Pecherkin V. Y., Vasilyak L. M. et al., Plasma Phys. Rep. **47**, 623 (2021).
5. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., Zaitsev F. S. et al., IEEE Trans Plasma Sci. **49** (3), 1028 (2021).
6. Bychkov V. L., Bikmukhametova A. R., Chernikov V. A., Deshko K. I. et al., IEEE Trans on Plasma Sci. **48** (2), 350 (2020).
7. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., Zaitsev F. S. et al., IEEE Trans Plasma Sci. **49** (3), 1034 (2021).
8. Raizer Y. P., Gas Discharge Physics, New York, Springer, 1991.
9. Kozlov B. A. and Solov'ev V. I., Zhur. Tekh. Fiz. **77** (7), 70 (2007).
10. Eichwald O., Guntoro N. A., Yousfi M. and Benhenni M., J. Physics D: Applied Physics **35**, 439 (2002).
11. Lacoste D. A., Pai D. Z. and Laux C. O. Proc. 42nd AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. USA, Reno, Nevada. 2004, pp. AIAA-2004-354.
12. Semenov V. K., Ivanovsky state power university Bulletin **5**, 69 (2013).
13. Semenov V. K., Ivanovsky state power university Bulletin **6**, 105 (2013).
14. Landau L. D. and Lifshitz E. M., Electrodynamics of continuous media, Moscow, Nauka, 1982 [in Russian].
15. Matveev A. N. Electrodynamics, Moscow, Vysshaya Shkola, 1980 [in Russian].
16. Shiryayeva S. O. and Grigoriev A. I., Methods for calculating critical conditions of electrodynamic instabilities. Study guide. Yaroslavl: P.G. Demidov Yaroslavl State University, (1996) [in Russian].
17. Grigoriev A. I., Ball lightning. Yaroslavl: P.G. Demidov Yaroslavl State University, 2006 [in Russian].
18. Saranin V. A. and Ivanov Y. V., Equilibrium of liquids and its stability, Moscow-Izhevsk: Research Center Regular and chaotic dynamics, 2009 [in Russian].
19. Shiryayeva S. O., Grigoriev A. I. and Orlova K. I., Electronic processing of materials **54**, 41 (2018) [in Russian].
20. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Volkov S. A. et al., Russ. J. Phys. Chem. **B9**, 807 (2015).
21. Ardelyan N. V., Bychkov V. L. and Kosmachevskii K. V., IEEE Trans. Plasma Sci. **45**, 3118 (2017).
22. Physical quantities. Reference book Ed. Grigoryev I. S. and Meilikhov E. Z., Moscow, Energoatomizdat, 1991.
23. Kaptsov N. A., Electric phenomena in gases and vacuum, Moscow-Leningrad, State Publisher. Tech.-Teor. Lit., 1950.