

03;04;12

Лидерный разряд на поверхности воды в виде фигур Лихтенберга

© В.П. Белошеев

Всероссийский научный центр "ГОИ им. С.И. Вавилова",
199034 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 14 сентября 1997 г.)

Исследовался лидерный многоканальный разряд по поверхности воды типа фигуры Лихтенберга. Установлено, что омическая проводимость воды обуславливает нелинейность $R(t)C$ -разрядной цепи. В ходе разряда устанавливается взаимно однозначное соответствие между длиной каналов и протекающим по ним током, а разряд имеет самосогласованный характер. Предложен механизм инициирования начальных каналов максимумами зарядовой структуры плоского двойного слоя на поверхности воды, возникающими в ходе развития в нем неустойчивости типа Рэлея-Бенара после достижения воды импульсной короной с анода.

В работе [1] проведено исследование условий формирования одноканального искрового разряда по поверхности воды в плане использования его для УФ обеззараживания воды. Результаты этой работы позволили, в частности, выявить особенности развития искрового разряда по поверхности воды, связанную с ее проводимостью, в сравнении с развитием искрового разряда по поверхности твердого диэлектрика [2]. Подробно влияние этой особенности воды на развитие по ее поверхности одноканального лидера искрового разряда исследовано в работе [3]. В ней на основе экспериментально определенных распределений напряженности поля и плотности тока по длине лидера и скорости его головки до момента остановки лидера установлено, что его развитие имеет самосогласованный характер, а инвариантом развития является произведение величины накопительной емкости на величину начальной разности потенциалов его головки и поверхности воды под ней. Естественным продолжением работ [1–3] можно считать исследование многоканального лидерного разряда по воде типа разряда по твердому диэлектрику, известному как фигура Лихтенберга. Этому и посвящена данная работа.

Разряд по поверхности воды инициировался уменьшением длины воздушного промежутка в разряднике 6. Напряжение на емкости U_c и разрядный ток i осциллографировались в ходе развития разряда с помощью омического делителя напряжения 7 и шунта 8. Фотографирование разряда осуществлялось фотокамерой 9 на пленку Изопанхром (тип 22) с одинаковой во всех случаях диафрагмой объектива.

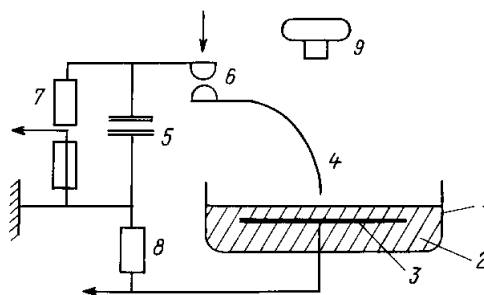
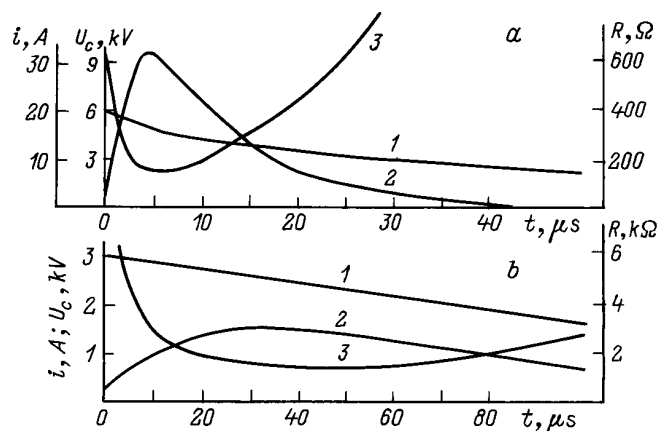


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Экспериментальная установка и условия эксперимента

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Она включает в себя цилиндрическую стеклянную кювету 1 диаметром 9 см, высотой 1,5 см, наполненную на две трети водопроводной водой 2 с проводимостью $\approx 1 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. В воде концентрично с кюветой размещался латунный диск 3 диаметром 7 см и толщиной 0,05 см, служивший катодом. Диск располагался на глубине 0,3 см от поверхности воды. Анодом 4 служил конец проволоочки из нержавеющей стали $\varnothing 7,5 \cdot 10^{-3}$ см, располагавшийся на расстоянии 0,1–0,3 см от поверхности воды над центром кюветы. В экспериментах использовалась накопительная емкость 5 величиной 0,1 μF , заряжавшейся до начального напряжения $U_0 = 3\text{--}6$ kV.



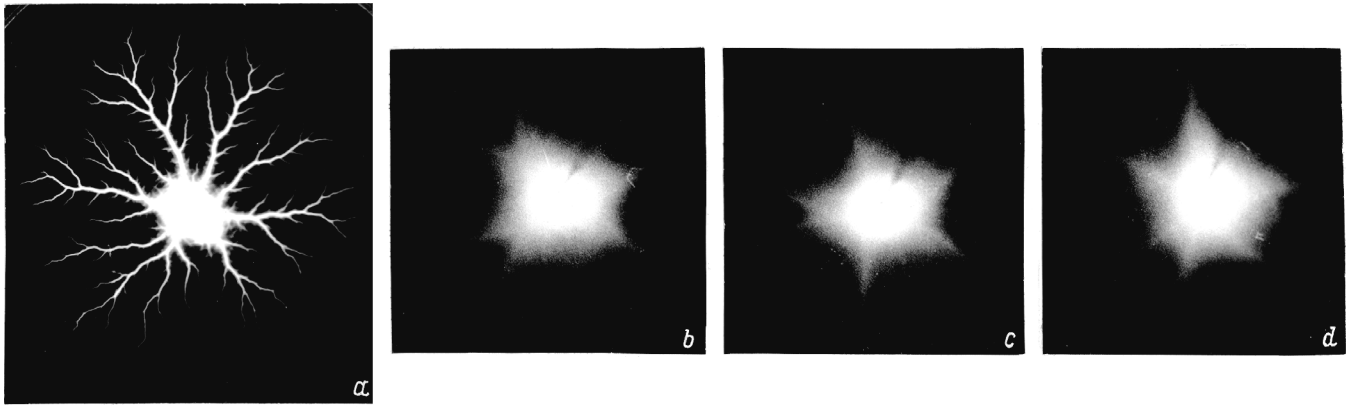


Рис. 3. Разряды при $U_0 = 6$ (a), 3 kV (b–d).

Результаты экспериментов

В экспериментах в диапазоне $U_0 = 3–6$ kV получены осциллограммы U_c и i (рис. 2, кривые 1, 2) и интегральные фотографии разрядов (рис. 3, a–d). Осциллограммы тока позволяют определить амплитуду начального тока $i_0 = 0.3$ и 3 А при $U_0 = 3$ и 6 kV соответственно, вычислить величину начального сопротивления разрядной цепи $R_0 = U_0/i_0$, а также, используя осциллограммы U_c и i , вычислить значение сопротивления разрядной цепи в другие моменты времени (рис. 2, кривая 3). Кроме того, по осциллограммам тока определялись амплитуда максимального тока i_M и время его достижения t_M , что позволяло вычислить величину перенесенного к этому моменту времени заряда $q_M \approx (i_M \cdot t_M)/2$ и построить график зависимости всех этих величин от U_0 (рис. 4).

На рис. 3 можно видеть центральную диффузно светящуюся область, развивающиеся из нее каналы и расфокусированное по мере удаления от поверхности воды изображение проволочного анода (рис. 3, b–d). В диапазоне $U_0 = 3–6$ kV диаметр диффузной области, определенный по негативам, увеличивается приблизительно линейно от ≈ 0.15 до ≈ 0.3 см. Как и в [3], каждый канал имеет боковые ветви различной длины, направленные под углом к оси канала, и ответвления длиной порядка диаметра канала, нормальные к его оси (рис. 3, a). Причем если при $U_0 = 3$ kV ответвления имеют место практически по всей длине каналов, то при $U_0 = 6$ kV — только вблизи от их начала. Структура каналов разряда практически симметричная при $U_0 = 3$ kV была асимметрична при больших U_0 . Это, по-видимому, связано с непараллельностью катода и поверхности воды. В этом случае клиновидность слоя воды на больших длинах каналов скажется заметнее.

Число начальных каналов при $U_0 = 3$ kV было 3–6. Из 29 разрядов вероятность возникновения 3 начальных каналов (рис. 3, b), 4 (рис. 3, c), 5 и 6 (рис. 3, d) соответственно равна 0.17, 0.62, 0.14 и 0.07. В случае $U_0 = 6$ kV число начальных каналов было 3 или 4 с примерно равной вероятностью. Радиус структуры, усредненная максимальная длина каналов l_M , линейно зависит от U_0

(рис. 4). Используя эти данные и время достижения максимальной длины каналов, можно определить среднюю скорость развития каналов при различных U_0 (рис. 5).

Обсуждение результатов экспериментов

Полученные в экспериментах осциллограммы U_c , i и интегральные фотоснимки многоканального лидерного разряда не позволяют проследить динамику развития разряда и его удельные электрические характеристики. В условиях одноканального лидерного разряда [3] это удалось сделать, привлекая данные о распределении тока и напряжения вдоль разрядного канала во времени, полученные с помощью зондовой методики. Но поскольку условия проведения данных экспериментов (проводимость воды, толщина ее слоя над катодом и диапазон начальных напряжений) были одинаковы с [3], а осциллограммы напряжения на емкости и тока в обоих случаях оказались качественно подобными, то можно предположить, что имеет место качественное сходство процессов развития одноканального и многоканального лидерных разрядов. Количественные же отличия связаны с большими площадью двумерного катода и суммарной площадью каналов, т.е. с меньшим сопротивлением разрядной цепи в данном случае. Исходя из этого, на основе [1,3] и данных экспериментов можно считать, что при наличии положительного напряжения на аноде 4 на поверхности воды возникают отрицательные проляризованные заряды с осесимметричным распределением плотности в соответствии с распределением электрического поля в промежутке анод–катод. Затем с анода начинает развиваться импульсная корона и в разрядной цепи возникает емкостный ток. Продолжительность этой фазы разряда $\approx 0.1 \mu\text{s}$. С момента касания коронным конусом поверхности воды проводимость всего промежутка анод–катод приобретает омический характер. Амплитуда тока в этот момент времени $i_0 = 0.3$ А при $U_0 = 3$ kV и 3 А при $U_0 = 6$ kV. Столь сильное различие величины начального тока связано с тем, что при $U_0 = 6$ kV возрастает не только площадь сечения коронного конуса

на поверхности воды, но и сечение токопроводящего слоя воды над катодом. Этот вывод подтверждается тем, что в случае одномерного проволочного катода $\varnothing 0.16$ см, $U_0 = 6$ кВ и прочих равных условиях в [3] $i_0 = 0.2$ А.

Дальнейший рост тока в цепи связан уже с развитием разрядных каналов по поверхности воды. При этом имеет место взаимно однозначное соответствие между их длиной и амплитудой протекающего по ним тока. Увеличение же площади каналов и токопроводящего слоя воды над катодом приводит к соответствующему уменьшению сопротивления разрядной цепи (рис. 2, кривые 1, 3).

Как установлено в [3], развитие канала определяется разностью потенциалов его головки и поверхности воды под ней. Причем плазмообразование в головке, как и вдоль всего канала, связано главным образом с нормальной к поверхности воды составляющей напряженности поля, также определяющей и протекание тока в слое воды. Скорость же головки в основном определяется продольной составляющей поля, от которой также зависит и проводимость канала. Величина разности потенциалов головки и воды в ходе развития канала снижается из-за спада напряжения на емкости и главным образом из-за роста падения напряжения на самом канале. Это приводит к уменьшению скорости головки и ее остановке. В этот момент времени длина каналов и ток достигают максимума, а сопротивление разрядной цепи становится минимальным (рис. 2).

В сравнении с одноканальным разрядом [3] при одинаковом $U_0 = 6$ кВ максимальная амплитуда тока многоканального разряда выросла в 5–6 раз. Это привело к более быстрому спаду напряжения на емкости. Соответственно быстрее уменьшается разность потенциалов головок и поверхности воды. А поскольку начальные скорости головок в обоих случаях должны быть примерно равными (одинаковы), то длина каналов многоканального разряда была меньше, чем у одноканального [3].

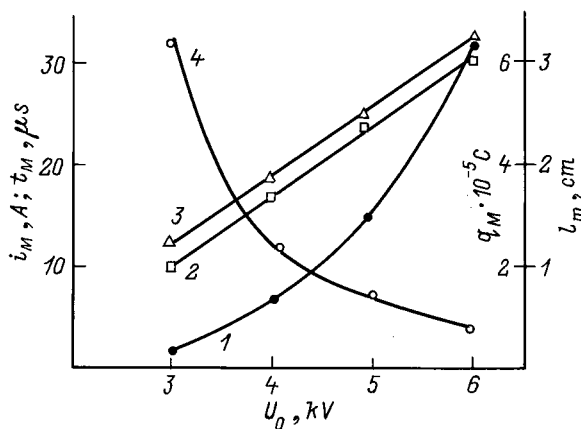


Рис. 4. Зависимости максимальных величин тока (1), длины каналов (2), перенесенного заряда (3), времени их достижения (4) от начального напряжения на емкости.

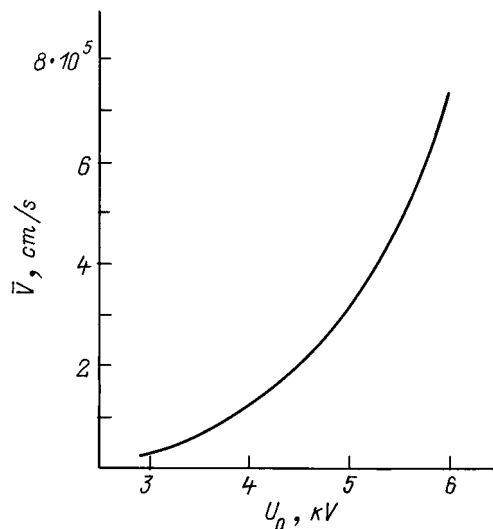


Рис. 5. Зависимость средней скорости развития каналов от начального напряжения.

С прекращением роста тока в канале нарушался баланс мощности. Мощность потерь превышала выделяющуюся мощность за счет прохождения тока и прежде всего в головке каналов, что приводило к распаду в них плазмы и сокращению максимальной длины каналов. Это и запускало механизм взаимнооднозначного соответствия тока и длины каналов, но уже в сторону их дальнейшего сокращения [3].

Напряжение на емкости (рис. 2, кривая 1) до максимума тока падает линейно. С уменьшением тока снижается и скорость уменьшения напряжения. К моменту прекращения тока напряжение на емкости примерно равно трети начального, а дальнейший разряд емкости происходит за счет остаточной проводимости воздушного промежутка и воды.

Многоканальность и симметричность конечной структуры разряда определяется соответствующей начальной его структурой. Это заставляет рассмотреть ее возникновение подробнее, чем было сделано в [1,3]. В условиях этих работ имело место несимметричное относительно анода распределение поля в разрядном промежутке. Тем не менее начальная структура разряда была также многоканальной, и только в результате конкуренции между каналами оставался один канал, развивавшийся в предпочтительных условиях, по оси промежутка. Это говорит о том, что начальная многоканальность разряда во всех случаях связана с симметрией коронного разряда, в котором после касания его поверхности воды и возникли начальные каналы. В данных условиях при симметричном двумерном катоде все изначально возникшие каналы были в равных условиях и имели возможность развиваться до конца, что облегчает исследование этой стадии. Из этих же соображений эксперименты проводились при $U_0 = 3$ кВ, когда засветка короной центральной части снимка была минимальной.

Прежде всего отметим, что каналы после возникновения (рис. 3, *b-d*) и в ходе ветвления (рис. 3, *a*) расходятся. Это говорит о том, что в обоих случаях процесс носит электростатический характер и все каналы имеют заряд одного знака. Следовательно, весь пограничный слой плазмы, начиная с короны, имеет одинаковый положительный заряд. Поэтому в момент достижения коронным конусом отрицательно заряженной поверхности воды над ней возникает плоский двойной слой. Поле этого слоя, вытягивая электроны с поверхности воды (катода), и обеспечивает с этого момента омическую проводимость в разрядном промежутке.

С ростом тока в цепи уже при $i = 0.1$ А его плотность в области анода, учитывая его диаметр, достигает $\approx 10^4$ А/см², что неизбежно вызывает контрагирование тока в коронном конусе. Ярко светящийся канал можно было наблюдать на фоне короны визуально. Развиваясь от анода до поверхности воды, эта неустойчивость в момент ее достижения двойного слоя вызвала скачок потенциала и могла приводить к возникновению колебаний плотности зарядов и появлению пространственной зарядовой структуры типа Рэлей–Бенара. Ее максимумы могли инициировать развитие разрядных каналов. При этом канал, возникающий первым, и каждый последующий, увеличивая ток в цепи, повышали потенциал в центре структуры, способствуя развитию последующих каналов. С другой стороны, снижение напряжения на емкости при резкой зависимости от него скорости головки, судя по рис. 5 и данным [3], должно замедлять развитие последующих каналов. Эти противоположные тенденции и определяли временной интервал возникновения каналов и, следовательно, их число, поскольку момент возникновения канала имеет случайный характер. Но, кроме того, по-видимому, имеет место и пространственное ограничение числа каналов, связанное с соотношением периметра коронного конуса и диаметра каналов. Поскольку при меньшем U_0 меньше ток и, следовательно, диаметр начальных каналов, то при $U_0 = 3$ их число на коронном пятне могло разместиться больше. Сравнительно же большая во всех случаях вероятность возникновения 4 начальных каналов (рис. 3, *a, c*) связана с характером их электростатического взаимодействия. В условиях осесимметричного поля и однородной поверхности воды второй канал вероятнее возникнет диаметрально противоположно первому, а затем крестообразно возникнут третий и четвертый каналы. Если же вначале синхронно возникнут два канала, разнесенные по азимуту на угол, меньший 180° , то в дополнение к ним вероятнее возникнет третий канал, образуя устойчивую электростатическую структуру (рис. 3, *b*). Хотя, конечно, на число каналов и начальную структуру влияют и случайные неоднородности на поверхности воды.

Интегральные снимки не позволяют утверждать, что действительно имели место 5 и даже 6 начальных каналов, поскольку это могло быть и результатом быстрого деления первых каналов. Но снимки тем не менее дают возможность с учетом взаимнооднозначного соответ-

ствия между током и длиной канала предполагать последовательность возникновения каналов по их максимальной длине и величине угла сектора, занимаемого ветвями канала. До начала ветвления возникшие каналы развиваются независимо. Однако уже после первой развилки между ними начинается конкуренция за площадь поверхности воды, через которую протекает ток. Первый канал и каналы, возникшие с меньшей задержкой, будут до конца развиваться в большем секторе и иметь большую амплитуду тока. В итоге через них будет перенесен больший заряд и они достигнут большей длины. Но так будет только в условиях симметричного катода. Клиновидность же слоя воды и, следовательно, асимметрия величины его сопротивления и тока по каналам приведут к асимметрии их структуры (рис. 3, *a*).

Как видно из рис. 4, усредненная длина каналов l_M и величина перенесенного в цепи заряда до максимума тока q_M одинаково зависят от величины начального напряжения. Это означает пропорциональность l_M и q_M и совпадает с выводом [3], что произведение величины накопительной емкости на величину начальной разности потенциалов головки и поверхности воды под ней, т.е. перенесенным зарядом, является инвариантом развития каналов. Естественно, что из-за разброса моментов возникновения каналов величины l_M и q_M для каждого канала различаются.

Все сказанное о структуре многоканального разряда, а также детальное подобие его осциллограмм тока и напряжения на емкости и соответствующих осциллограмм одноканального разряда [3] позволяют утверждать, что и в данном случае с началом развития по поверхности воды каналов, разрядная цепь становится нелинейной $R(t)C$ -цепью. В ходе разряда устанавливается взаимно однозначное соответствие между длиной каналов и током, а в целом он имеет самосогласованный характер. Это позволяет с единых позиций рассматривать связь энергетических характеристик и структуры каналов лидерного разряда по поверхности диэлектрика, имеющего проводимость.

Список литературы

- [1] Белошеев В.П. // ЖТФ. 1996 Т. 66. Вып. 8. С. 50–58.
- [2] Андреев С.И., Зобов Е.А., Сидоров А.И. // ПМТФ. 1978. № 3. С. 38–44.
- [3] Белошеев В.П. // ЖТФ. 1998 Т. 68. Вып. 7. С. 44–50.