

03;04;12

Исследование лидера искрового разряда по поверхности воды

© В.П. Белошеев

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

(Поступило в Редакцию 2 декабря 1996 г.)

Экспериментально исследовались лидеры незавершенных искровых разрядов емкостей 0.1 и 1 μF по поверхности воды при начальном напряжении 3–6 kV в разрядных промежутках длиной 8 и 22 см, имевших боковые ветви и без ветвей. Определены распределения напряженности поля, тока, плотности тока, проводимости и концентрации электронов по длине лидера, а также изменения скорости и длины лидера в ходе его развития. Установлено, что развитие лидера имеет самостоятельный характер, а инвариантом его пространственного развития является произведение величины накопительной емкости на величину начальной разности потенциалов головки лидера и поверхности воды.

Введение

Искровой разряд по поверхности воды (ИРПВ) предложено в [1] использовать как источник УФ излучения для дезактивации микроорганизмов в объеме воды. Исследование формирования ИРПВ для этих целей предпринято в [2]. Вместе с тем проведенные там эксперименты показали, что, являясь по сути скользящим разрядом с лидерным механизмом развития, ИРПВ имеет существенную особенность в сравнении со скользящим разрядом по твердому диэлектрику, связанную с омической проводимостью воды. Это обстоятельство, в частности, позволяет формировать по воде лидеры в широком диапазоне начальных напряжений и в соответствии с этим с весьма различными параметрами: током, длиной и скоростью движения, в условиях завершеного или незавершеного разряда. Последний случай особенно удобен для исследования развития лидера.

В плане изучения лидерного механизма развития ИРПВ в [2] основное внимание было уделено фазе формирования лидера в ходе конкуренции нескольких начальных лидеров. Данная работа посвящена исследованию динамики развития лидера и параметров его канала. Эта информация может быть полезной для понимания лидерного механизма развития длинных искровых разрядов в атмосфере, в том числе и молниевых, поскольку получить всю необходимую экспериментальную информацию о крупномасштабных разрядах в атмосфере достаточно сложно [3].

Схема и условия экспериментов

Лидеры ИРПВ формировались в прямоугольной кювете из оргстекла 1 (рис. 1, а) размером 23 × 4 × 1.5 см, наполненной водопроводной водой 2 с проводимостью $\approx 1 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Конический анод 3 из стальной проволоки $\varnothing 0.1$ см имел радиус закругления $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ см и располагался в исходном состоянии на расстоянии ≈ 1 см от поверхности воды. Катодом 4 служила проволока из нержавеющей стали $\varnothing 0.16$ см и

длиной 8 или 22 см, помещавшаяся в воде на расстоянии 0.3–0.8 см от поверхности воды. При меньшей толщине слоя воды в ней происходил пробой. Накопительная емкость 5 величиной 0.1 или 1 μF заряжалась до начального напряжения $U_0 = 3\text{--}7.5$ kV, измерявшегося киловольтметром 6. После этого инициирование лидера осуществлялось уменьшением расстояния между анодом и поверхностью воды до 0.1–0.3 см соответственно.

Полный ток в разрядной цепи (i) (рис. 2) измерялся с помощью шунта 7, напряжение с которого подавалось на осциллограф. Напряжение на емкости (U_c) (рис. 2) осциллографировалось с использованием омического делителя напряжения 1 : 1000 8 с величиной сопротивлений 5 k Ω и 5 M Ω . Кроме того, с помощью зонда из проволоки $\varnothing 0.01$ см 9, касавшейся поверхности воды над катодом, и омического делителя напряжения 1 : 1000 10 с величинами сопротивлений 10 k Ω и 10 M Ω можно было осциллографировать относительно земли потенциал поверхности воды вдоль разрядного промежутка, а также канала лидера (рис. 3).

Структура и геометрия каналов лидера исследовалась визуально через микроскоп с увеличением от $8\times$ до $30\times$ с измерительной сеткой, что позволяло измерять диаметр канала в любом сечении, а также по интегральным фотографиям. Фотографирование лидеров производилось на пленке изопанхром-22 с размером кадра 35 × 24 в масштабе 1 : 2 и 1 : 1. Интегральная фотография лидера, развивающегося на свободной воде при $U_0 = 6$ kV, емкости 0.1 μF и толщине слоя воды 0.3 см, представлена на рис. 4, а.

Однако большинство экспериментов проводилось в условиях, когда лидер формировался вдоль щели шириной 0.16 см между двумя или четырьмя кварцевыми брусками 11, лежащими на дне кюветы вплотную к катоду и выступавшими над поверхностью воды на ≈ 0.05 см (рис. 1, а). На рис. 4, б показан лидер в таких условиях при $U_0 = 6$ kV, $C = 0.1$ μF и толщине слоя воды 0.3 см. В этом случае кроме полного тока производилось осциллографирование тока собственно лидера i_l (рис. 5) поясом Роговского 12, выполненным на ферритовом

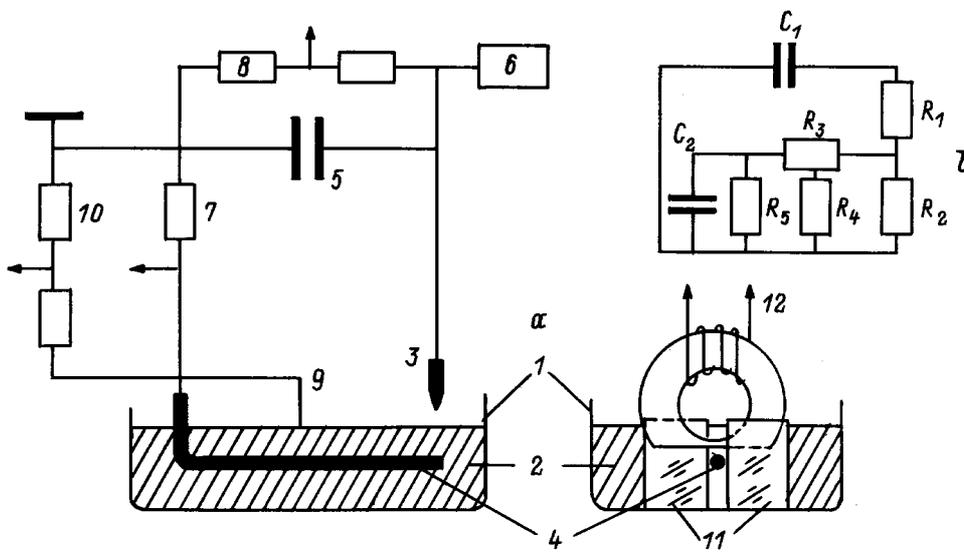


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и эквивалентная схема разрядной цепи с лидером незавершенного ИРПВ (b).

кольце с наружным и внутренним диаметром соответственно 2.5 и 1 см и толщиной 0.25 см.

Кольцо, покрытое слоем воска, частично погружалось в воду между четырьмя кварцевыми брусками так, что лидер проходил через кольцо. Напряжение с обмотки, намотанной на остальной части кольца и также покрытой воском, пропорциональное отношению числа ее витков к величине сопротивления нагрузки, подавалось на осциллограф. Передвигая бруски с ферритовым кольцом по длине лидера, можно было измерять ток лидера в любом его сечении.

Результаты экспериментов

В обоих вариантах формирования ИРПВ основные эксперименты проводились с накопительной емкостью $0.1 \mu\text{F}$, длиной разрядного промежутка 8 см и толщиной слоя воды над катодом 0.3 см. В этих условиях при $U_0 \geq 7 \text{ kV}$ в промежутке имел место завершённый ИРПВ, а при $U_0 = 3-6 \text{ kV}$ — лидеры незавершённых разрядов длиной $\approx 1-5 \text{ cm}$ соответственно. Однако для выяснения тенденций изменения параметров лидера в зависимости от начальных условий в ряде экспериментов слой воды увеличивался до 0.8 см. Это приводило при прочих равных условиях к уменьшению длины лидера и величины максимального тока в цепи примерно вдвое. Использовалась также накопительная емкость величиной $1 \mu\text{F}$. В этом случае в разрядном промежутке длиной 22 см с толщиной слоя воды над катодом 0.3 см и $U_0 = 6 \text{ kV}$ развивался завершённый ИРПВ. С увеличением толщины слоя воды до 0.8 см в промежутке имел место только лидер незавершённого разряда. Его длина на свободной воде достигала 20 см, а величина максимального тока в цепи 17 А.

В диапазоне $U_0 = 3-6 \text{ kV}$ на свободной воде или в щели лидер развивался после уменьшения расстояния между анодом и поверхностью воды от 1 до 0.1–0.2 см соответственно. При этом вначале у анода, в воздухе, развивался коронный разряд, затем он перекрывал весь воздушный промежуток в виде конуса, опиравшегося основанием на воду, из которого по поверхности воды и прорастал лидер. Все параметры лидера однозначно определялись величиной емкости, начальным напряжением, толщиной слоя воды и условиями на поверхности воды. С емкостью $0.1 \mu\text{F}$ при $U_0 = 3 \text{ kV}$ и толщине слоя воды 0.3 см длина лидера $\approx 1 \text{ cm}$ и приблизительно линейно увеличиваясь до $\approx 5 \text{ cm}$ при $U_0 = 6 \text{ kV}$. На свободной воде длина лидера в этих условиях была на 10% больше. Яркость канала и его диаметр от анода по длине лидера монотонно убывали. Цвет свечения со стороны анода был белый, а у головки синевато-сиреневый. Диаметр канала лидера на фотопленке в 1.3 раз больше наблюдаемого в микроскоп. На рис. 6 приведено усредненное значение диаметра канала по длине лидера в щели при $U_0 = 6 \text{ kV}$, толщине слоя

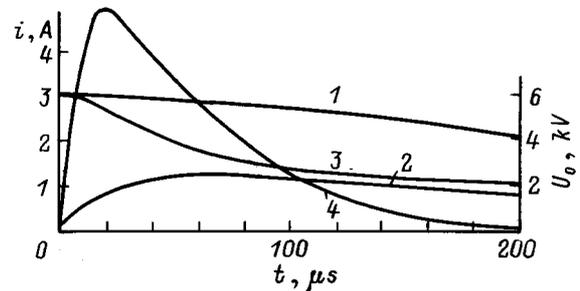


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на емкости и полного тока в цепи. Щель: 1 — U_c , 2 — i ; свободная вода: 3 — U_c , 4 — i .

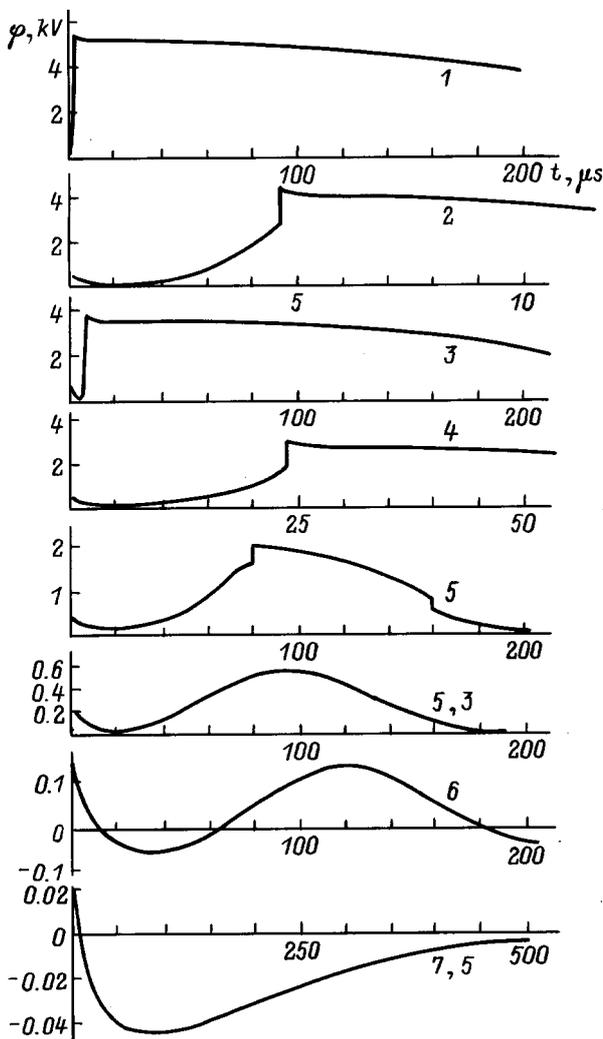


Рис. 3. Осциллограммы потенциала в разрядном промежутке. Цифры у кривых — расстояние от анода до зонда в см.

воды 0.3 см с амплитудой полного тока в цепи $i = 1.2$ А (рис. 2). Этот ток содержит две компоненты. Одна из них i_{cr} протекает через воздушный промежуток и слой воды под анодом, на который развивался коронный разряд, а другая i_l — через воздушный промежуток, через канал лидера по всей длине и слой воды под ним. Она и есть собственно ток лидера. На осциллограмме полного тока i , регистрируемого шунтом, коронная фаза i_{cr} длится $\approx 0.1 \mu s$ (установление ионной проводимости воды происходит за время ≈ 1 нс). Амплитуда $i_{cr} = 0.2$ А, достигаемая за это время, зависит от U_0 и проводимости слоя воды. Дальнейший рост i в цепи связан с развитием лидера. Время достижения максимального i зависит от U_0 , толщина слоя воды и условий на поверхности воды. На свободной воде максимальная амплитуда i в 2.5 раза больше, а время ее достижения в 2.5 раза меньше, чем в случае развития лидера в щели (рис. 2). Используя осциллограммы тока лидера в различных его сечениях по длине (рис. 5), можно построить распределение тока по

длине канала лидера от анода в любой момент времени. На рис. 6 представлено распределение тока лидера при $U_0 = 6$ кВ, достигшего максимальной длины 5.2 см на $80 \mu s$. Оно вместе с зависимостью площади поперечного сечения канала от расстояния до анода дает возможность вычислить значения плотности тока в канале лидера по его длине (рис. 6).

Осциллограммы напряжения на емкости (рис. 2) имеют два характерных участка: близкий к линейному спад в области максимума i и затем более замедленный спад, когда i уменьшается до нуля, а напряжение — до $\approx 0.3U_0$. Осциллограммы U_c и i позволяют определить зависимости величин сопротивлений разрядной цепи от времени для различных условий на поверхности воды (рис. 7).

Осциллографирование потенциала зонда, расположенного в различных точках разрядного промежутка (рис. 3), дает возможность установить изменение потенциала поверхности воды над катодом (φ_B) до прихода в эту точку промежутка головки лидера (полого нарастающая часть осциллограммы), время задержки прихода головки лидера и величину ее потенциала (φ_h) (резкое увеличение сигнала), а также изменение потенциала поверхности воды в тех точках разрядного промежутка

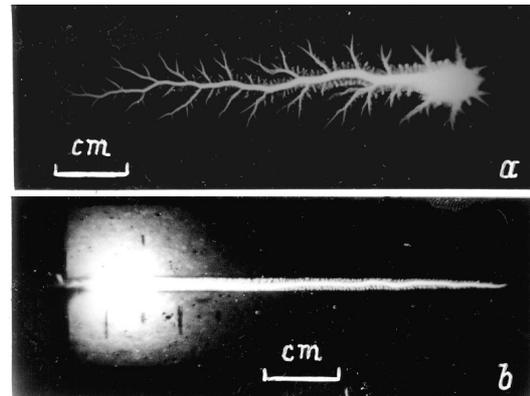


Рис. 4. Интегральные фотографии лидеров. *a* — свободная вода, *b* — щель.

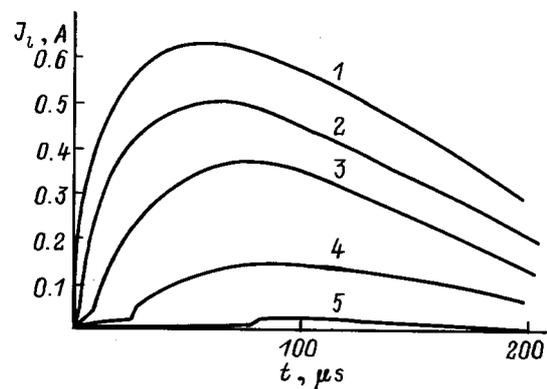


Рис. 5. Осциллограммы тока лидера. Цифры у кривых — расстояние от анода до пояса Роговского в см.

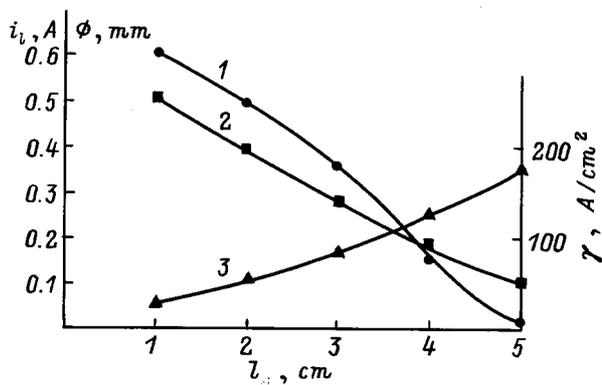


Рис. 6. Распределение тока, плотности тока и величины диаметра канала по длине лидера от анода. 1 — i , 2 — ϕ , 3 — γ .

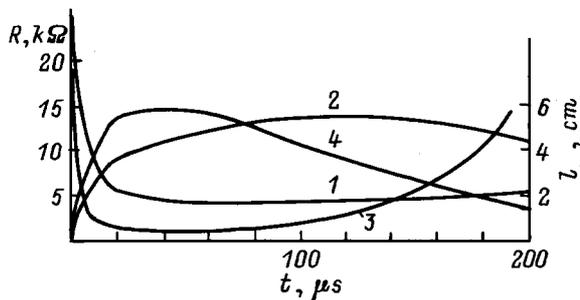


Рис. 7. Зависимость сопротивления промежутка и длины лидера от времени. Щель: 1 — R , 2 — l , свободная вода: 3 — R , 4 — l .

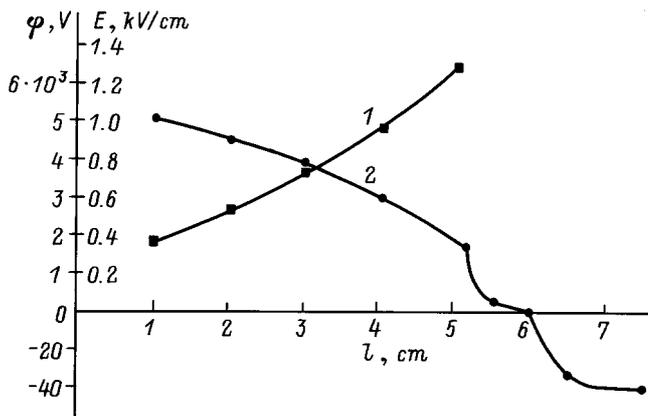


Рис. 8. Распределение потенциала и напряженности поля в разрядном промежутке в момент остановки лидера. 1 — E , 2 — ϕ .

($l \geq 5.3$ cm), куда лидер не доходил. Отметим, что положительный выброс вначале осциллограммы связан с зарядом емкости зонда относительно земли.

На основании таких осциллограмм можно построить распределение потенциала по длине лидера и всего промежутка для любого момента времени. На рис. 8 пред-

ставлены такое распределение для 80 μs, когда лидер остановился, а также напряженность поля вдоль канала в этот момент времени. По этим же осциллограммам с зонда можно также определить зависимости потенциала головки, поверхности воды перед ней и разности потенциалов между ними (ΔU) от длины лидера (рис. 9). Кроме того, используя данные о времени задержки прихода головки в различные точки промежутка (рис. 10), можно определить величину средней скорости головки в интервалах между этими точками (длина интервала 1 cm). Ее зависимость от длины лидера показана на рис. 10.

Осциллограммы потенциала зонда позволяют также установить и момент отрыва головки лидера от зонда по резкому спаду потенциала на 200–300 V на заднем фронте осциллограммы (рис. 3, $l = 5$ cm). Это дает возможность построить зависимость длины лидера от времени не только на стадии его развития, но и на стадии сокращения его длины после максимума тока (рис. 7).

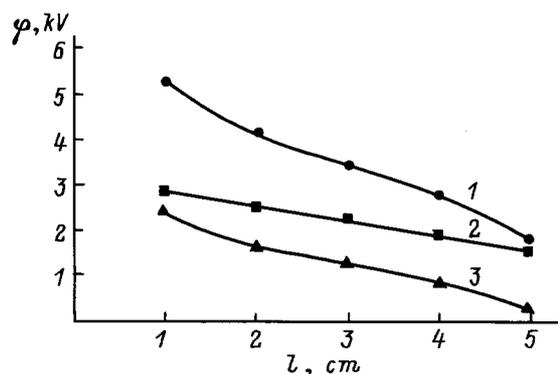


Рис. 9. Зависимость потенциала головки, поверхности воды и разности потенциалов между ними от длины лидера. 1 — потенциал головки, 2 — потенциал поверхности воды, 3 — разность потенциалов головки и воды.

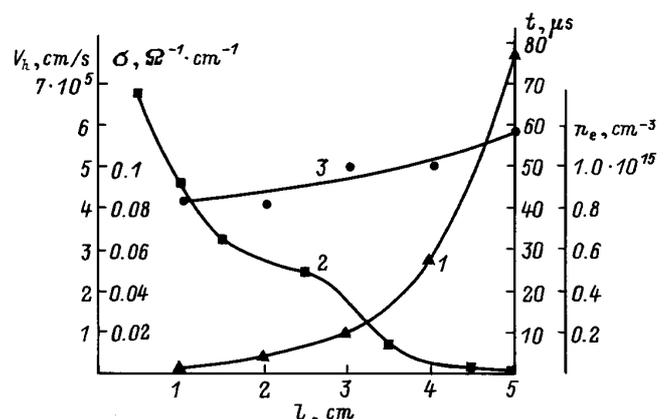


Рис. 10. Зависимость времени движения головки и скорости головки от длины лидера и распределение проводимости и электронной концентрации плазмы по длине канала в момент остановки лидера. 1 — t , 2 — V_h , 3 — σ и n_e .

Обсуждение результатов

При рассмотрении развития лидера незавершенного ИРПВ можно выделить 5 аспектов: начальную стадию возникновения лидера, структуру канала, лидер как элемент RC -цепи, плазмообразование в головке и ее движение, параметры плазмы канала лидера. В этом плане и будут обсуждаться полученные результаты.

Однако вначале необходимо сделать замечание о терминологии. В данной работе для описания лидера ИРПВ используются термины, принятые для описания лидеров длинных искровых разрядов в воздухе. И хотя ясно, что пробой разрядного промежутка вдоль границы двух сред с существенно отличными ε , имеющего в 10–100 раз меньший размер, не может быть вполне аналогичным пробую длинного воздушного промежутка, все же можно отметить в обоих случаях качественное подобие начальной импульсной короны с анода, а кажущееся отсутствие стримеров от нее и головки связано с их малой длиной, соответствующей радиусам острия анода и головки [3] и яркостью свечения. Эти соображения указывают, что и в работе [2] наблюдались лидеры, а не стримеры. Таким образом, только отсутствие буквально головки на конце лидера ИРПВ отличает его структуру от структуры лидера длинного искрового разряда в воздухе.

Как видно из рис. 3, в начальный момент поверхность воды над катодом имела отрицательный потенциал. Его величина (≈ 40 В на расстоянии 7.5 см от анода) определялась соотношением емкости воздушного промежутка и слоя воды над катодом, а также величиной U_0 . С момента достижения коронным разрядом поверхности воды ее потенциал повышается и определяется уже соотношением сопротивления плазмы и слоя воды под основанием коронного разряда. С этого момента и начинается развитие лидера.

Судя по рис. 4, а, на свободной воде при равенстве длины промежутка и катода лидеры начинают развиваться во всех направлениях (лидер в противоположную сторону от катода закрыт анодом). Но в дальнейшем развивался лишь один лидер вдоль катода. Если использовался катод вдвое длиннее разрядного промежутка, то лидеры над катодом развивались в обоих направлениях от анода практически симметрично. Это связано с наличием на поверхности воды над катодом квазиодномерного потенциально-зарядового рельефа (ПЗР).

В [2] катод располагался в воде вертикально и начальный ПЗР на воде был менее выражен, поэтому от анода в сторону катода начинало развиваться до 4 лидеров, но вследствие конкуренции между ними несколько микросекунд спустя оставался лишь один, приводивший к пробую разрядного промежутка с соответствующей задержкой. При этом распределение времени задержки, имевшее 4 максимума, и определялось характером конкуренции лидеров. В данном случае ПЗР способствовал развитию лидера над катодом и конкуренция по времени заканчивалась в пределах одной микросекунды.

Как видно из рис. 4, а, структура лидера на свободной воде состоит из канала, боковых ветвей и ответвлений. В случае щели имеет место только канал с ответвлениями, наличие которых свидетельствует о том, что и в данном случае ПЗР неодномерен. А уменьшение на свободной воде общей плотности структурных элементов лидера с удалением от канала, очевидно, связано с соответствующим изменением плотности начальных поляризационных зарядов на поверхности воды. Боковые ветви и ответвления по всему каналу соответственно имеют примерно одинаковые длины и расположены через равные интервалы. Однако их яркость и диаметр больше у основания канала и боковых ветвей. Это, по-видимому, связано с тем, что развивались они только короткое время вслед за головкой лидера, а потом с падением напряженности поля их развитие прекращалось, в то время как их яркость и диаметр связаны с амплитудой и длительностью протекавшего через них тока. Вдоль канала боковые ветви расположены, как правило, несимметрично, что свидетельствует о конкуренции в ходе возникновения развилки. Причем та ветвь, которая развивалась ближе к оси промежутка, имела из-за ПЗР большую скорость и становилась затем участком канала лидера. Таким образом, ПЗР является одной из причин отсутствия на конце лидера головки традиционного вида. Процесс ветвления должен приводить к неравномерности движения лидера и пульсациям тока, но зарегистрировать их в данном случае невозможно из-за большого числа несинхронно развивающихся элементов лидера.

В [2] показано, что разрядная цепь с накопительной емкостью C и незавершенным ИРПВ является $R(t) \cdot C$ -цепью. В условиях той работы развитие лидера обеспечивало линейно падающий характер тока в цепи. Это позволяло решить дифференциальное уравнение для тока в цепи и получить аналитическое выражение для сопротивления промежутка, имеющее минимум. Это говорит о том, что лидер в ходе незавершенного ИРПВ играет роль нелинейного регулирующего элемента в разрядной цепи. В данной работе при меньшей проводимости воды и большем разрядном промежутке начальное сопротивление в разрядной цепи было значительно больше, а ток меньше, поэтому развитие лидера обеспечивало не только спрямление, но и дальнейший рост тока в цепи (рис. 2). Эквивалентная схема ее представлена на рис. 1, б, где C_1 — накопительная емкость, R_1 — сопротивление плазмы в промежутке анод–вода, R_2 — сопротивление слоя воды под анодом, R_3 — сопротивление канала лидера, R_4 — сопротивление слоя воды между каналом лидера и катодом, R_5 — сопротивление слоя воды в области головки лидера и C_2 — емкость слоя воды, которая с учетом сравнительно высокой омической проводимости воды на развитие лидера заметно не влияла. Это обстоятельство и отличает ИРПВ от скользящего разряда по твердому диэлектрику, когда ток лидера имеет емкостной характер.

Как видно из рис. 7, величина сопротивления разрядного промежутка до начала развития лидера равна $R_1 + R_2 \simeq 25 \text{ k}\Omega$. С развитием лидера и ростом тока R_1 падает и им можно пренебречь, а сопротивление промежутка считать зависящим от $R_2 - R_5$. Причем если R_2, R_5 можно полагать постоянными, то с увеличением длины лидера R_4 уменьшается, уменьшая сопротивление промежутка и увеличивая ток лидера. В то время как R_3 с ростом лидера увеличивается и одновременно с ростом тока уменьшается. В итоге сопротивление промежутка на стадии роста тока лидера падает. При этом длина лидера, амплитуда тока и сопротивление промежутка достигают экстремальных значений одновременно.

В случае лидера на свободной воде боковые ветви, увеличивая площадь контакта плазмы с водой, дополнительно уменьшают R_4 , увеличивая ток и тем самым уменьшая R_3 . В итоге сопротивление промежутка становится еще меньше, экстремальные значения достигаются быстрее, но опять одновременно. Последующее сокращение длины лидера приводит к росту сопротивления промежутка и затягиванию спада напряжения на емкости.

Как уже указывалось, разряд в воздушном промежутке между анодом и водой начинается с острия анода как коронный и затем переходит, судя по амплитуде тока $\simeq 0.2 \text{ A}$, в аномальный тлеющий с последующим контрагированием и стремлением к дуговому разряду. Две последние формы разряда имеют положительный столб и катодный слой, на котором падает большая часть напряжения и генерируется плазма. С учетом материала катода, рода газа и его плотности толщина катодного слоя в нашем случае $\simeq 10^{-3} \text{ cm}$ [4], что вполне сопоставимо с наблюдаемым диаметром головки лидера $\varnothing \simeq 10^{-2} \text{ cm}$. Это позволяет предположить, что лидер, зарождаясь на границе катодного слоя на поверхности воды, сохраняет в дальнейшем и механизм плазмообразования катодного слоя, связанный с высокой напряженностью поля и наличием быстрых электронов, способных эффективно ионизовывать воздух перед головкой. И поскольку диаметр головки остается неизменным, то эффективность плазмообразования будет все время определяться разностью потенциалов головки и поверхности воды (рис. 9). При этом величина нормальной к поверхности воды составляющей напряженности поля на границе головки на расстоянии 1 cm от анода $\frac{\Delta U}{\varnothing} = 250 \text{ kV/cm}$. Определить продольную составляющую напряженности поля перед головкой труднее, поскольку распределение потенциала по поверхности воды перед головкой, связанного с наличием в слое воды перед головкой продольной составляющей тока, можно установить только качественно. Но если учесть, что характерная длина выноса положительного потенциала перед головкой $\simeq 1 \text{ cm}$ (рис. 8), то величина продольной составляющей напряженности поля $\simeq 6 \text{ kV/cm}$. Сопоставление полученных величин составляющих поля, с одной стороны заставляет предположить, что плазмообразование в головке связано в основном с нормальной составляющей поля, а с другой, указывает на возможную причину малой

плотности стримеров перед головкой и их малой длины из-за недостаточности продольной составляющей поля для их интенсивного развития.

Продольная составляющая напряженности поля, кроме того, является источником кулоновской силы, движущей головку, но движение плазмы на границе головки происходит еще и за счет процессов переноса в ходе плазмообразования. Эти два обстоятельства и объясняют быстрое уменьшение скорости лидера из-за снижения ΔU при сравнительно медленном падении напряжения на емкости (рис. 9, 10).

Величина начальной разности потенциалов (ΔU_0) и, следовательно, V_0 определяется соотношением R_1 и R_2 , а также величиной U_0 . Вместе с тем в ходе развития лидера имеет место равенство $U_c = U_5 + \Delta U + U_3 + U_1$ (U_5, U_3, U_1 — падение напряжения на R_5, R_3, R_1). Вблизи максимума тока величиной U_1 можно пренебречь, тогда $U_c \simeq U_5 + \Delta U + U_3$, и поскольку U_c и U_5 медленно падают, а U_3 с ростом лидера увеличивается, то ΔU и V уменьшаются. Причем начальное относительное удлинение лидера велико, поэтому U_3 нарастает быстро, а ΔU и V быстро падают. Однако набрав длину, лидер в силу связи между его длиной и током оказывает уже стабилизирующее действие на V (рис. 10). Так как снижение V уменьшает приращение длины лидера, то замедляется рост i, U_3 , а следовательно, и спад ΔU и V . Тем не менее при непрерывном увеличении длины лидера и тока наступает момент, когда $U_5 + U_3 = U_c$, $\Delta U = 0$ и лидер останавливается. При этом ток перестает расти, а сопротивление промежутка уменьшаться. Однако продолжающееся снижение U_c вызовет уже уменьшение тока и, следовательно, вкладываемой мощности в канал лидера. А поскольку стационарность плазмы в широком смысле обеспечивается равенством вкладываемой мощности и мощности потерь, то начнется распад плазмы и именно с головки, где потери больше. Это приводит к сокращению длины лидера, что, увеличивая сопротивление промежутка, еще больше уменьшает ток. Таким образом, в ходе развития лидера связь между его длиной и током вначале обеспечивает их взаимный рост, а затем взаимное сокращение. Момент смены этих фаз определяется величиной U_5 , зависящей от U_0 . Поэтому и возникает внешне парадоксальная ситуация, в которой при $U_0 = 6 \text{ kV}$ лидер останавливается, если $U_c \simeq 5.5 \text{ kV}$, тогда как он формируется и достигает длины 1 cm при $U_0 = 3 \text{ kV}$.

Разница в развитии лидера по щели и на свободной воде связана с боковыми ветвями в последнем случае. Они, увеличивая ток в канале, увеличивают его проводимость, уменьшая U_3 и скорость снижения ΔU_0 . Поэтому и начальное падение скорости лидера на свободной воде меньше. Однако больший в этом случае разрядный ток (рис. 2) ускоряет спад U_c и экстремальные значения длины лидера, тока и сопротивления промежутка достигаются быстрее, но по-прежнему синхронно, а большая средняя скорость движения обеспечивает равенство максимальной длины лидера в обоих случаях. Такая взаимно-

связь параметров лидера во времени свидетельствует о самосогласованном его развитии.

В экспериментах с накопительной емкостью $C = 1 \mu\text{F}$, толщиной слоя воды 0.8 cm и том же $U_0 = 6 \text{ kV}$ спад U_c происходит медленнее, чем с емкостью $0.1 \mu\text{F}$, что приводит к большей средней скорости головки, длине лидера и амплитуде тока. Этот случай с учетом изложенного выше позволяет предполагать, что произведение $C \cdot \Delta U_0$ является инвариантом пространственного развития лидера.

Проведенные эксперименты ставились с целью прежде всего понять динамику развития лидера, но они, кроме того, позволяют определить и электрические параметры канала лидера ИРПВ. И эти параметры не только дополняют картину развития лидера в данном случае, но имеют и самостоятельное значение, поскольку в других условиях определить их экспериментально по всей длине лидера практически невозможно. При анализе распределения γ и σ по длине канала в момент остановки лидера (рис.6, 10) необходимо учитывать снижение точности измерения тока и диаметра канала в области головки из-за малости их величин. А распределение $n_e = \sigma/e \cdot \mu$ (e — заряд, μ — подвижность электронов) (рис. 10) определено с величиной $\mu = 1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, скорее соответствующей значению напряженности поля в области головки [3]. Поэтому с ослаблением поля вблизи анода в ходе развития лидера величина n_e там может быть еще меньше, поскольку $\mu \sim E^{-1/2}$ [4,5].

Снижение n_e и σ в старых участках канала связано с его расширением, имеющим диффузионный характер, и падением со временем вкладываемой там мощности. Выявленные тенденции изменения параметров плазмы вдоль канала лидера в данном случае совпадают с имеющимися в литературе представлениями о величине и распределении этих параметров в канале длинного лидера в атмосфере [3].

В работе не предполагалось исследовать состояние плазмы в канале лидера. И хотя ее параметры, определенные из экспериментальных данных с учетом сравнительно медленной кинетики развития лидера $\simeq 10^{-5} \text{ s}$, казалось бы, позволяют говорить о равновесном состоянии плазмы с температурой $4000\text{--}6000 \text{ K}$ [5,6], однако малый диаметр канала, наличие в нем кроме продольных еще и поперечных составляющих поля и тока и генерация плазмы по всей длине образующей канала, скорее указывают на неравновесность плазмы в канале, и особенно в области головки. Поэтому для решения этого вопроса необходима дополнительная спектроскопическая информация.

Все вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы.

1. Формирование ИРПВ при средней напряженности поля в промежутке $0.3\text{--}1 \text{ kV/cm}$ связано с развитием лидера.

2. Развитие лидера определяется разностью потенциалов его головки и поверхности воды и имеет самосогласованный характер. Инвариантом пространственного

развития лидера является произведение величины накопительной емкости на величину начальной разности потенциалов головки лидера и поверхности воды.

3. Плазмообразование в головке лидера связано с наличием в ней нормальной к поверхности воды составляющей электрического поля, имеющей высокую напряженность из-за малого диаметра головки.

4. Движение головки лидера определяется как продольной составляющей напряженности поля перед головкой, так и ее нормальной составляющей на границе головки.

Список литературы

- [1] Белошеев В.П. Устройство для обеззараживания и очистки питьевой и сточной воды. Патент РФ № 2042641 от 14.05.92 г.
- [2] Белошеев В.П. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 8. С. 50–58.
- [3] Базелян Э.М., Рожанский И.М. Искровой разряд в воздухе. Новосибирск: Наука, 1988.
- [4] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. С. 366.
- [5] Грановский В.Л. Электронный ток в газе. М.: Наука, 1971. С. 102.
- [6] Хаддстоун Р., Ленард С. Диагностика плазмы. М.: Мир, 1967. С. 169.