

03;04;12

Самоорганизация структуры лидерного разряда по поверхности воды

© В.П. Белошеев

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

(Поступило в Редакцию 20 мая 1999 г.)

На основе экспериментальных работ по признакам самоорганизации динамических диссипативных систем установлено, что в процессе развития структуры лидерного разряда по поверхности воды имеет место самоорганизация.

В последние годы усиливается интерес к изучению процесса самоорганизации в живых и физических системах. И именно последние дают большие для этого возможности из-за их относительной простоты, развитой для них теоретической методологии и техники эксперимента. Постановка этой проблемы исторически и нынешнее ее состояние связаны с небольшим числом физических систем, где имеют место процессы самоорганизации. Поэтому увеличение их числа и разнообразия свойств, несомненно, будет плодотворным для изучения самоорганизации структур.

В данной работе процесс самоорганизации структуры выявлен в развитии лидерного разряда по поверхности воды (ЛРПВ). Его исследование было предпринято в связи с формированием искрового разряда по поверхности воды [1] с целью использования его как источника УФ излучения для дезактивации микроорганизмов в объеме воды [2].

В условиях [1], когда цилиндрический катод был частично погружен вертикально в воду, а острие анода располагалось над поверхностью воды на расстоянии 1–3 см от катода, было установлено, что развитие лидеров по поверхности воды приводит к шунтированию сопротивления слоя воды в разрядном промежутке и возникновению нелинейной обратной связи по току между напряжением на промежутке и его сопротивлением, т. е. в случае, когда источником энергии для ЛРПВ является конденсатор, в разрядной цепи имеет место $R(t)$ C -разряд и экспоненциальный спад тока в цепи и напряжения на ее элементах уже не имеют места.

Дальнейшие исследования ЛРПВ [3,4] в условиях скользящего разряда (рис. 1) показали, что в зависимости от типа катода одномерного или двухмерного ЛРПВ будет квазиодномерным или квазидвухмерным (рис. 2). Движение лидерной головки определяется разностью ее потенциала и поверхности воды перед ней, а структура лидера образуется за счет многократного деления головки вследствие уплощения ее формы. При этом образующаяся структура ЛРПВ фрактальна с величиной фрактальной размерности $D = 0.96$ и 1.85 соответственно для квазиодномерного и двухмерного разрядов, а динамика их развития имеет самосогласованный характер [4,5].

В данной работе рассматривается дополнительная экспериментальная информация, позволяющая глубже по-

нять роль коронирования в развитии лидера. С учетом этого и [3–5] по признакам самоорганизации структуры в условиях неравновесной динамической диссипативной системы [6,7], а именно самопроизвольности и пороговости возникновения и распада структуры и связи величины диссипируемой в системе мощности с возникновением структуры, устанавливается факт самоорганизации и структуры ЛРПВ.

Условия формирования структуры ЛРПВ

Процесс формирования структуры более отчетливо прослеживается на примере двухмерного ЛРПВ [4]. Схема экспериментальной установки для его реализации и исследования приведена на рис. 1. Она включает в себя цилиндрическую стеклянную кювету 1 диаметром 9 см, высотой 1.5 см, наполненную на две трети обычной водой 2 с проводимостью $\cong 1 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. В воде концентрично с кюветой размещался латунный диск диаметром 7 см и толщиной 0.05 см, служивший катодом 3. Диск располагался на глубине 0.3 см от поверхности воды. Анодом 4 служил конец проволоочки из нержавеющей стали диаметром $7.5 \cdot 10^{-3}$ см, располагавшийся на расстоянии 0.1 – 0.3 см от поверхности воды над центром кюветы.

В экспериментах использовалась накопительная емкость 5 величиной $0.1 \mu\text{F}$, заряжавшаяся до начального напряжения $U_0 = 3 - 6 \text{ kV}$. Разряд инициировался уменьшением длины воздушного промежутка в разряднике 6. Напряжение на емкости U_c и разрядный ток i осцилло-

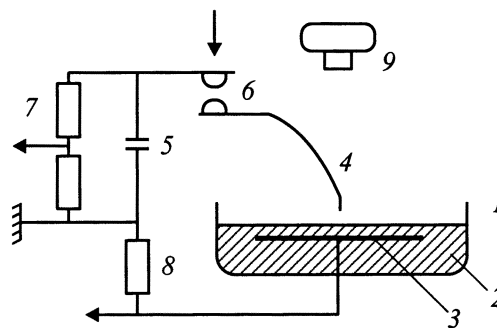


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

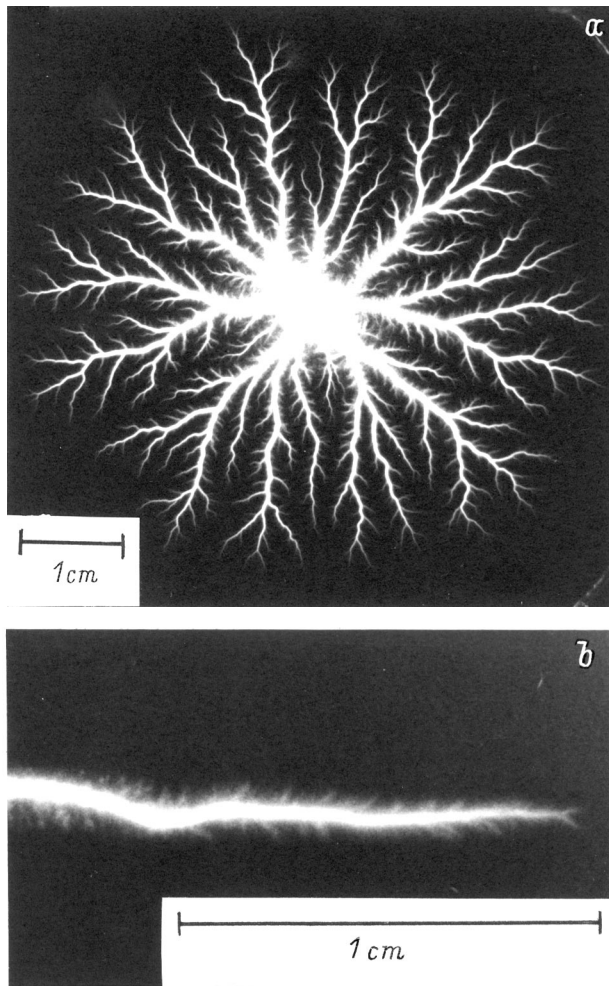


Рис. 2. Двухмерный разряд (а) и конечный участок одномерного (b).

графировались в ходе разряда с помощью омического делителя напряжения 7 и шунта 8 (рис. 3). Фотографирование разряда осуществлялось фотокамерой 9. Детально условия экспериментов изложены в [3,4].

При начальном напряжении $U_0 = 3 - 6 \text{ kV}$ с плюсом на аноде (1 на рис. 4) в воздушном промежутке анод-вода (2) развивался коронный разряд в форме конуса (3). Когда основание коронного конуса достигало поверхности воды, по ней начинали развиваться 3-6 начальных лидера (4). С началом разряда в воздушном промежутке в разрядной цепи протекал ток, величина которого увеличивалась от значения, характерного для коронного разряда, до величины $i_0 = 3 \text{ A}$ ($U_0 = 6 \text{ kV}$) (рис. 3, 2) после касания коронного конуса поверхности воды. За время этой фазы длительностью $\approx 100 \text{ ns}$ в промежутке анод-вода у поверхности воды формировался катодный слой (5 на рис. 4), необходимый для протекания в цепи тока проводимости, и начальный коронный разряд последовательно сменялся тлеющим, аномальным тлеющим и дуговым разрядом (6). Величина тока $i_0 = U_0/R_0$, где R_0 — сопротивление разрядной цепи, состоящее

из сопротивления плазмы в промежутке анод-вода и сопротивления слоя воды над катодом под коронным конусом. Дальнейший рост тока в цепи уже связан с развитием ЛРПВ, увеличением площади его структуры и слоя воды под ней, определяющего сопротивление разрядной цепи в этой фазе разряда [4].

В [3] структура квазиодномерного лидера представлялась состоящей из канала, боковых ветвей и ответвлений. Существование стримеров у головки предполагалось, но в соответствии с [8] их длина ожидалась порядка радиуса головки и на фотоснимке всего лидера они выявлены не были. Однако на фотоснимке с большим увеличением у одномерного лидера, развивавшегося в щели (рис. 2, b), на последнем сантиметре канала с обеих его сторон на диффузном фоне видны нитеобразные структуры. На большем расстоянии от головки уже имеют место ответвления. Более отчетливо эти нити наблюдались в микроскоп с 16-м увеличением. Длина нитей увеличивалась от 150 у головки до 400 μ на расстоянии 1 cm от нее, а интервалы между ними там уменьшались соответственно от 100 до 30 μ . Диаметр нитей составлял 20-30 μ и не изменялся вдоль канала. На этом же участке лидера угол между каналом и нитями

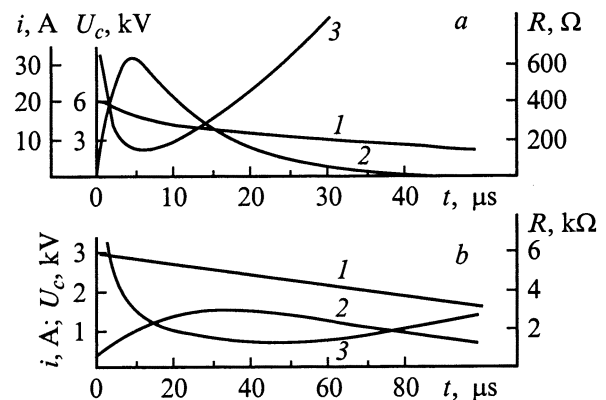


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на емкости (1), разрядного тока (2) и зависимость сопротивления разрядной цепи от времени (3). $U_0 = 6$ (а), 3 kV (b).

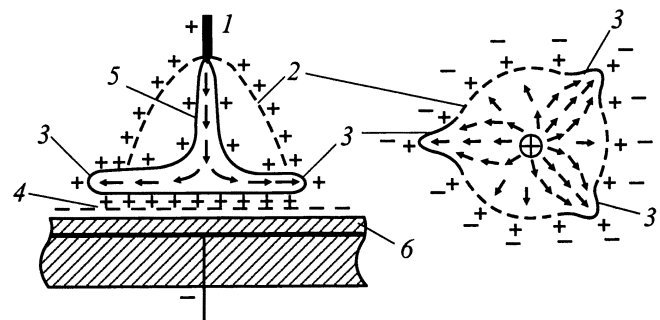


Рис. 4. Фазы разряда в промежутке анод-вода Коронный — штриховая линия, контрагированный — сплошная линия. Плюсы и минусы — заряды на поверхности плазмы и воды, стрелки — линии тока.

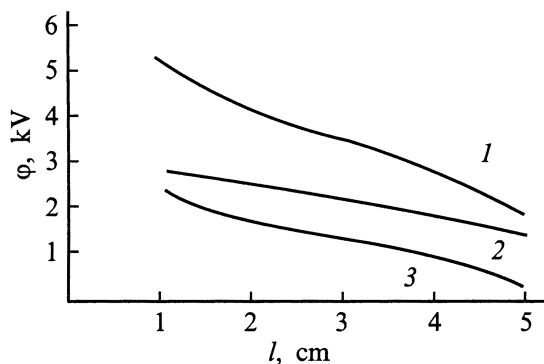


Рис. 5. Зависимости потенциалов головки (1), поверхности (2) воды и разности потенциалов между ними (3) от длины лидера.

увеличивался от 20 до 80° соответственно. Однако перед головкой лидера нити на фотоснимке и в микроскоп не наблюдались. При этом надо учитывать, что изображение на интегральном снимке идентично передает только конечный участок остановившегося лидера. Тогда как с удалением от головки изображение лидера, в том числе и в микроскоп, представляет собой непрерывное наложение его предыдущих изображений.

На основании известных данных об импульсной короне [8,9] можно полагать, что наблюдаемые нити являются стримерами, развивающимися в ходе коронирования движущейся головки.

Движение головки лидера определяется кулоновской силой, пропорциональной разности потенциалов головки и поверхности воды перед ней $U = \varphi_{\Gamma} - \varphi_{\text{В}}$ (рис. 5), но оно также неразрывно связано и с образованием плазмы на фронте головки. В [3] предполагалось, что образование плазмы в головке главным образом происходит в катодном слое, падение напряжения на котором составляет $0.3\text{--}0.4\text{ кВ}$. Поэтому головка останавливается когда $\Delta U = 0$.

Однако установление факта коронирования головки и совпадение в пределах погрешности эксперимента величины порогового потенциала коронирования острия в воздухе, равного 2.3 кВ [10], с потенциалом головки в момент ее остановки, равным 2 кВ , при всех начальных напряжениях в исследованном диапазоне $3\text{--}6\text{ кВ}$ говорит о существенном вкладе коронирования головки в образование плазмы. С другой стороны, из этого следует, что развитие стримеров имеет место только перед движущейся головкой, когда ее потенциал больше 2.3 кВ . Поэтому и отсутствуют на снимке стримеры перед остановившейся головкой.

Важная роль коронирования головки в развитии лидера подтверждается и спадом ее скорости от $1\text{--}2 \cdot 10^5$ до $1\text{--}2 \cdot 10^4\text{ см/с}$, когда потенциал головки снижается до величины $\approx 3\text{ кВ}$ (рис. 5). Такая же величина потенциала анода является пороговой и для начала развития лидера, причем эта пороговость имеет синергетическую природу.

Необходимая величина потенциала анода складывается из пороговой величины потенциала коронирования острия в воздухе 2.3 кВ и пороговой величины падения напряжения на катодном слое $0.3\text{--}0.4\text{ кВ}$. Движение же головки со скоростью $1\text{--}2 \cdot 10^4\text{ см/с}$, когда $\Delta U \geq 0.4\text{ кВ}$, осуществляется в том числе и за счет образования плазмы в катодном слое. И только с его разрушением, когда $\Delta U \leq 0.3\text{ кВ}$, головка останавливается. Заметим, что остановка головки лидера не означает прекращения коронирования остального канала и разрушения катодного слоя вдоль него, поскольку ближе к аноду потенциал канала еще имеет достаточную величину. Но по мере снижения напряжения на емкости и аноде, головка лидера отступает к аноду и длина лидера сокращается.

Таким образом, развитие ЛРПВ от начала до конца проходит на двух уровнях. Оно начинается на микроуровне в слое плазмы коронного конуса у поверхности воды, откуда затем развиваются начальные лидеры уже как первые элементы макроструктуры (рис. 4). Однако развитие макроструктуры за счет движения головок и их деления также обеспечивается микропроцессами, происходящими в короне и катодном слое, возникновение которых имеет пороговый характер. Поэтому и процесс возникновения структуры ЛРПВ также имеет порог по начальному напряжению.

Структура ЛРПВ и диссипируемая в разрядной цепи мощность

Вторым признаком самоорганизации в динамической диссипативной системе является рост диссипируемой в ней мощности в ходе самоорганизации структуры. Как уже говорилось, структура ЛРПВ развивается из $3\text{--}6$ начальных лидеров при последующих многократных делениях их головок.

Движение каждой головки в структуре ЛРПВ определяется ее взаимодействием с результирующим полем поляризационных зарядов на поверхности воды и окружающих ее элементов структуры. Поэтому на периферии структуры опередившие соседей головки движутся в радиальном направлении, тогда как движение отставших головок и в центре структуры определяется локальным полем структуры, вектор которого имеет случайное направление.

Сочетание детерминированного радиального и произвольного движения головки и определяет пространственную стохастичность и фрактальность структуры [5]. При этом величина фрактальной размерности структуры D не зависит от числа начальных лидеров и величины начального напряжения в диапазоне $4\text{--}6\text{ кВ}$, в котором она определялась. Величина фрактальной размерности структуры связана с полной длиной ее элементов L в заданном радиусе r , а именно $L \sim r^D$. Поскольку в нашем случае радиус структуры равен длине лидеров (l), а она $l \sim t^{1/2}$ [3,4], то $L \sim t^{D/2}$. В то же время сопротивление разрядной цепи определяется сопротивлением слоя воды

под структурой, т. е. зависит от ее размеров и плотности элементов и в конечном счете $R \sim 1/L \sim t^{-D/2}$. Напряжение на емкости за время развития структуры снижается сравнительно мало (рис. 3), поэтому ток в цепи $i = U_0/R \sim t^{D/2}$, а диссипируемая в разрядной цепи мощность $P \sim i^2 R \sim t^{D/2}$, т. е. мощность, диссипируемая в разрядной цепи на стадии роста тока, пропорциональна полной длине элементов структуры.

Выше говорилось, что после прекращения коронирования головки она замедляется, а после сравнения ее потенциала с потенциалом воды головка останавливается. Это приводит к прекращению роста тока, нарушению баланса мощности в канале, распаду плазмы в головке, сокращению размера структуры и дальнейшему снижению тока и, следовательно, мощности в разрядной цепи и т. д. [3].

Проведенный выше анализ условий возникновения и развития структуры ЛРПВ и ее связи с диссипируемой в разрядной цепи мощностью позволяет по аналогии с процессами при самоорганизации в неравновесных динамических диссипативных системах [6,7] утверждать, что развитие структуры ЛРПВ также представляет собой процесс самоорганизации диссипативной системы.

Процесс самоорганизации структуры

Установление факта самоорганизации структуры ЛРПВ позволяет теперь перейти к более детальному анализу самого процесса самоорганизации. Он предполагает наличие в системе элементов, из которых образуется структура необходимых для этого условий и движущих факторов развития структуры.

Элементами сложившейся структуры ЛРПВ будем полагать лидерные каналы от коронного конуса до наиболее удаленной по радиусу головки, боковые ветви от каналов или более крупных ветвей до наиболее удаленной их головки, а также ветви последних развилок со своими головками. Ответвления мало значат в развитии ЛРПВ, и в данном случае рассматривать их не будем. Спецификой самоорганизации структуры ЛРПВ является то, что сами эти структурные элементы создаются в ходе ее развития и самоорганизации.

Как уже говорилось, на первой стадии развития структуры на границе слоя неравновесной плазмы коронного конуса выделяются области плазмы с повышенной плотностью зарядов, дающие начало головкам. Неустойчивость заряженной плазмы в электрическом поле обеспечивает их движение. В ходе этого движения за головкой возникает проводящий плазменный канал, передающий к головке потенциал коронного конуса. Возникшее плазменное образование из головки и канала и является начальным макроструктурным элементом, началом лидера. Дальнейшее его развитие сопровождается делением головки и появлением боковых ветвей как новых структурных элементов. С достижением определенного количества структурных элементов и возникновением

неустойчивости в системе начинается самоорганизация на макроуровне. Причем начальные каналы становятся первыми параметрами порядка, а затем боковые ветви и ветви ветвей лидеров образуют дальнейшую иерархию параметров порядка в развитии структуры ЛРПВ.

Несомненно, что ключевым процессом в развитии структуры ЛРПВ является деление головок лидеров. В [5] процесс деления головки связывался с наличием перед ней одноименного остаточного заряда и его ростом по мере движения головки, что приводит к уплощению ее фронта на точках его сопряжения с образующими канала. Однако возможно, что остаточный заряд не является решающим обстоятельством для деления головки лидера. Действительно, головка стримера, как правило, не делится, а сохраняет свою форму (самозатачивается) [11]. Этот самосогласованный процесс можно объяснить падением плотности энергии в канале стримера с удалением от головки, соответственно снижением интенсивности ионизационных процессов и сужением канала. Канал лидера с удалением от головки, наоборот, расширяется, при этом головка на оси и должна уплощаться. В таком случае можно утверждать, что плазменное образование с цилиндрическим каналом и полусферической головкой не может быть динамически устойчивым. В зависимости от характера связи головки с электродом такое образование должно неизбежно принять форму стримера с сужением канала или лидера с его расширением. Поэтому использование цилиндрической модели для анализа развития стримера и лидера будет обязательно приводить к ошибке.

В общем случае самоорганизация в системе возникает как следствие необходимости увеличения через нее потока энергии внешнего источника с ростом градиента на границах системы. При этом самоорганизация приводит к смене механизма передачи энергии через систему на более интенсивный. В жидкости в такой ситуации теплопроводность сменяется конвекцией в форме ячеек Бенара, в лазере спонтанное излучение сменяется вынужденным. В случае ЛРПВ система не может увеличить поток энергии за счет увеличения локальной интенсивности, поскольку электропроводность воды не меняется. В данном случае увеличение потока энергии через систему происходит за счет ее экстенсивного развития в форме ЛРПВ, при этом не только создаются его структурные элементы, но и обеспечивается нелинейный характер взаимодействия всей структуры с источником энергии, поддерживающий неустойчивость структуры.

Как известно, проявлением неустойчивости в системе является возникновение в ней положительной обратной связи (ПОС). В нашем случае она выражается в непрерывном поддержании на стадии роста тока взаимно однозначного соответствия между длиной лидера и током через него (l, i -соответствие) [3], т. е. между радиусом структуры и током через нее. Это соответствие есть следствие связи величины потенциала головки лидера с потенциалом анода (коронного конуса) через канал, проводимость которого зависит от величины протекающего

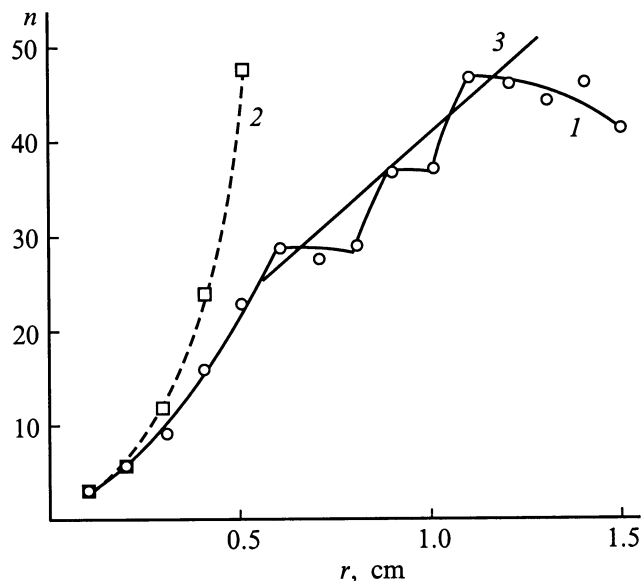


Рис. 6. Зависимость числа элементов от радиуса: 1 — реальная структура, 2 — при удвоении, 3 — усредненная зависимость для вычисления D .

по нему тока. Отметим, что наличие ПОС в процессе развития лидера внутренне присуще его динамике, т. е. является имманентным свойством динамики каждого элемента структуры ЛРПВ.

Рост числа элементов структуры по мере деления головок усиливает их зарядовое взаимодействие, которое выступает в развитии ее как отрицательная обратная связь (ООС), внутренне присущая всей структуре, т. е. имманентная структуре в целом.

Понятно, что в начале в развитии структуры преобладает ПОС, поэтому число элементов в ней удваивается на интервале 0.2 см (рис. 6). Затем под действием ООС темп роста элементов снижается, и в дальнейшем, судя по колебаниям числа элементов (кривая 1 на рис. 6), относительная роль ПОС и ООС в их совокупном действии на структурные элементы также колеблется. Это совокупное действие продолжается во все время развития структуры для всех ее элементов, по всей площади структуры. Оно зависит от расположения элемента в структуре и обеспечивает конкуренцию и селекцию элементов по скорости и, следовательно, по длине. В результате структура приобретает иерархическое самоподобие, т. е. становится фрактальной [5].

Однако пространственно-временные характеристики структуры определяются и еще рядом факторов. Поскольку каждый элемент структуры находится под действием детерминированного и случайного поля и расположение элемента определяет соотношение их действия на него и его изменения в ходе развития структуры, то структура ЛРПВ является стохастичной и характер ее стохастичности также изменяется во времени. С другой стороны, нестационарность источника энергии и

отсутствие границы для развития структуры исключают ее пространственную регулярность, как в случае ячеек Бенара или мод лазера, и структура остается и пространственно стохастической.

Все изложенное выше касается самоорганизации ЛРПВ с момента появления нескольких начальных лидеров. Хотя несомненный интерес представляет и сценарий их возникновения, т. е. процессы в слое плазмы у поверхности воды. Этот слой неравновесной плазмы образуется после контакта основания коронного конуса с поверхностью воды. Диаметр слоя соответствует диаметру основания конуса 0.1–0.3 см в зависимости от U_0 , а толщина его близка к диаметру головки $\approx 10^{-2}$ см. С ростом тока через слой в ходе его контрагирования по оси промежутка анод–вода резко возрастает ($\Delta t \approx 100$ ns) и поток энергии через слой, что может привести к возбуждению ионно-звуковых колебаний в слое плазмы. Пучности плотности зарядов по периферии слоя и могут инициировать развитие начальных лидеров.

Другая возможность их инициирования может быть связана с возникновением плоского двойного заряженного слоя в момент касания положительно заряженного основания коронного конуса и отрицательно заряженной поверхности воды (рис. 4). В дальнейшем этот слой выполняет роль катодного слоя для разряда в промежутке анод–вода. Его диаметр 0.1–0.3 см, а толщина $\approx 10^{-3}$ см [10]. С учетом плоской геометрии катодного слоя, встречного движения в нем электронов и ионов и резкого увеличения потока энергии с началом контрагирования тока в нем может возникнуть токовая структура типа ячеек Бенара. Косвенно такую возможность подтверждают данные о расщеплении тока в катодном слое тлеющего разряда [10] и упорядоченность катодных пятен [12]. При этом токовая структура катодного слоя будет модулировать плотность зарядов в прилегающем к нему со стороны анода слое плазмы (рис. 4), от пучностей которых на границе слоя и развиваются начальные лидеры.

В обоих случаях регулярность структуры плотности зарядов, в том числе и на периферии слоя, и определяет в обоих случаях достаточно симметричное расположение начальных лидеров. Хотя необходимость этого вытекает и из условия электростатической устойчивости самой возникающей структуры.

Возможен и третий сценарий возникновения начальных каналов. С учетом универсальности l, i -соответствия, как ПОС, радиальные микроскопические флуктуации плотности зарядов в слое плазмы коронного конуса у поверхности воды могут раскачиваться до макрофлуктуаций. Конкуренция между ними приведет к радиальному контрагированию тока в слое в несколько разнесенных по периметру слоя каналов (рис. 4). Конкуренция и в конечном итоге селекция макрофлуктуаций будут происходить и с учетом зарядового взаимодействия между ними, что обеспечит электростатическую устойчивость возникающей структуры начальных каналов.

Предложенные сценарии не исключают друг друга, а это значит, что реальный процесс самоорганизации на микроуровне может содержать в различные моменты времени элементы всех сценариев. Однако для дальнейшего анализа начальной стадии самоорганизации ЛРПВ необходимы специальные исследования. Они были бы полезны и для установления пределов детерминированности в начальной стадии самоорганизации любых систем. И в экспериментальном плане ЛРПВ, по-видимому, представляет наибольшие возможности в сравнении с другими физическими системами.

Проведенный анализ результатов экспериментального исследования ЛРПВ [3,4,5] позволяет сделать следующие выводы.

1. В развитии структуры ЛРПВ присутствуют все признаки самоорганизации неравновесной динамической диссипативной системы [6,7].

2. Самоорганизация ЛРПВ имеет две фазы. В ходе первой у поверхности воды в дискообразном слое неравновесной плазмы возникает радиальная структура плотности зарядов, из которой затем развивается структура токовых каналов ЛРПВ.

3. Развитие и самоорганизация структуры ЛРПВ связаны с ограничением в ней удельной диссипируемой мощности источника энергии. Это приводит к росту числа элементов структуры за счет деления и суммарной диссипируемой в них мощности, т.е. самоорганизация имеет место в экстенсивно развивающейся системе.

4. Развитие каждого элемента структуры обеспечивается движением его головки за счет потенциала источника, передаваемого к ней каналом, что свидетельствует о разделении их функций в процессе развития.

5. Самоорганизация структуры определяется совокупным действием ПОС — имманентной динамики каждого элемента структуры и ООС — имманентной структуры в целом. Это обуславливает конкуренцию элементов структуры, их селекцию и фрактальность структуры, а также самосогласованность динамики структуры и источника энергии.

6. Нестационарность источника энергии и отсутствие границы для развития структуры ЛРПВ определяют ее пространственно-временную стохастичность.

7. Предшествующие четыре пункта позволяют рассматривать самоорганизующуюся структуру ЛРПВ как универсальную эволюционную модель.

Список литературы

- [1] Белошеев В.П. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 8. С. 50–58.
- [2] Белошеев В.П. Устройство для обеззараживания питьевой и сточной воды. Патент РФ. № 2042641 от 14.05.92.
- [3] Белошеев В.П. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 7. С. 44–50.
- [4] Белошеев В.П. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 11. С. 63–66.
- [5] Белошеев В.П. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 35–40.
- [6] Пригожин И.П. // УФН. 1980. Т. 131. № 2. С. 189.
- [7] Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 226 с.

- [8] Базелян Э.М., Ражанский И.М. Искровой разряд в воздухе. Новосибирск: Наука, 1988.
- [9] Стекольников И.С. Природа длинной искры. М.: АН СССР, 1960. С. 55.
- [10] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [11] Райзер Ю.П., Симаков А.Н. // Физика плазмы. 1998. Т. 24. № 8. С. 754.
- [12] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя. М.: Наука, 1991. 125 с.