

# ФОРМИРОВАНИЕ МНОГООЧАГОВОГО РАЗРЯДА В ВОДЕ

А.П. Дрожжин, Д.И. Карпов, В.С. Тесленко

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр-т. ак. Лаврентьева, 15, Новосибирск, 630090, Россия*

Физическое явление, представленное в данной работе, реализуется в виде любого количества самостоятельных электрических разрядов, которые инициируются в жидкости в разные моменты времени, но, в отличие от искровых разрядов в газе, продолжают своё развитие параллельно друг другу [1]. Многоочаговый разряд существует в широком диапазоне значений удельного сопротивления воды, например, от 5.1 Ом·см [2] до 565 кОм·см [3]. Он применяется для генерации ударных волн в жидкости [4], инициирования самостоятельного объёмного импульсного разряда в газе [5] и может быть использован как источник ультрафиолетового излучения, озона и двуокиси водорода для стерилизации питьевой и сточных вод [6].

Многоочаговый разряд (МР) формируется только при электротепловом механизме пробоя жидкости [7], который предполагает ионизацию парогазовой фазы вещества. Парогазовые пузырьки легче всего формируются в водных электролитах в процессе локального нагрева жидкости электрическими токами. Высокая плотность токов, протекающих либо через металлические электроды, подключённые к одному полюсу импульсного источника питания, либо через отверстия диэлектрической перегородки обеспечивают локальный перегрев воды и приводят к взрывному вскипанию электролита с последующим зажиганием разрядов в пузырьках [8]. Ниже, для краткости, металлические электроды и отверстия перегородки будем называть концентраторами тока (КТ).

Прежние исследования многоочагового разряда проводились, в основном, с целью изучения электрогидродинамических процессов, протекающих на одном концентраторе тока, независимо от явлений, развивающихся на параллельно подключённых КТ. В работе [9] представлено качественное объяснение динамики взаимодействия между всеми разрядами. Авторами настоящей работы выполнены теоретический анализ и экспериментальное моделирование процессов, протекающих при параллельном инициировании и развитии разрядов на двух концентраторах тока, с целью изучения механизма существования многоочагового разряда в жидкости. Применение двух отдельных разрядных промежутков исключает акустическое взаимодействие между концентраторами тока, которое учитывалось при объяснении механизма многоочагового разряда в [9].

Форма пузырька, образующегося при диафрагменном разряде, определяется характером энерговыведения в жидкости. В рамках простейшей модели постоянства удельной электропроводности электролита  $\sigma$  выполнены расчеты распределения мощности энерговыведения в отверстиях диафрагмы.

Считалось, что электролит находится между двумя плоскими электродами радиуса  $R$ , расстояние между которыми  $L$ ; в центральном сечении промежутка помещена диэлектрическая пластина (диафрагма) толщины  $d$  с круглым отверстием радиуса  $r_0$ . Рассматривался стационарный случай, без учета теплопередачи в жидкости. Удельная электропроводность считалась одинаковой по всему объему (начальная стадия нагрева). На рис. 1 показано относительное энерговыделение в электролите. В качестве масштаба длины выбран радиус  $r_0$ , масштаб мощности –  $q_0 = s(V/L)^2$ , где  $V$  – напряжение на промежутке. Заметный нагрев электролита происходит только в области вблизи отверстия в диафрагме (рис. 1). Энерговыделение максимально вблизи краев отверстия и может превышать энерговыделение в центре отверстия почти на порядок для тонкой диафрагмы ( $d/r_0 \ll 1$ ). Из проведенных расчетов также следует, что при большей толщине диафрагмы ( $d/r_0 \geq 1$ ) распределение мощности внутри отверстия более равномерно. Таким образом, пузырёк должен формироваться на кромке отверстия и иметь форму близкую к тору, что полностью согласуется с кадрами скоростной киносъёмки (в тексте не приведены). После зажигания разряда, расширяющийся плазменный пузырёк принимает форму, близкую к сферической. Чем меньше проводимость воды, тем более разветвленную структуру имеет плазменное образование на КТ [3,7].

Существует пороговое значение напряжения, ниже которого многоочаговый разряд перестаёт существовать, а реализуется автоколебательный режим разряда [10]. Саморегулируемое развитие разрядов наблюдается при напряжениях, превышающих эту пороговую величину и проявляется в выравнивании амплитудных значений токов, протекающих через каждый концентратор тока (см. рис. 2).

С целью качественного объяснения механизма развития МР примем следующие допущения: 1) Плазменный пузырёк развивается на поверхности полусферического металлического КТ; 2) Противоположный электрод большего диаметра так же имеет полусферическую форму. Центры симметрии КТ и электрода совпадают; 3) Радиус концентратора тока намного меньше радиуса электрода, что приводит к упрощению формул и исключает из них последний параметр; 4) Проводимость электролита, плотность, удельная теплоёмкость воды постоянны и не зависят от температуры или напряжённости поля. С учётом выше представленных допущений рассмотрим процесс расширения плазменных пузырьков многоочагового разряда в виде последовательности событий: 1) Равномерный перегрев тонкого слоя жидкости вдоль всей поверхности КТ, а впоследствии и вдоль поверхности плазменного пузырька, со скоростью не менее  $v_T = 15$  К/мкс [8]; 2) Взрывное вскипание слоя жидкости; 3) Равномерное расширение парогазового слоя до размера, при котором произойдёт его пробой, а, следовательно, и увеличение диаметра сферического плазменного образования; 4) Перенос потенциала на новую поверхность пузырька. При этом будем считать, что поверхность плазменного

пузырька и полусферический электрод образуют обкладки сферического конденсатора [8].

Следует отметить, что в представленной модели необходимо учитывать время  $t_{кин}$ , через которое начинается взрывное кипение воды. Этот параметр зависит как от скорости нагрева жидкости [11], так и от параметров разрядной цепи. Так как его величина может составлять десятки микросекунд [11], то расчётные значения временных параметров разряда могут существенно отличаться от экспериментальных величин.

Предложенная модель позволяет оценить удельную объёмную мощность нагрева слоя электролита, прилегающего к поверхности каждого пузырька, следующим образом:

$$P_{v1} = V^2 \cdot \sigma / r_1^2, P_{v2} = V^2 \cdot \sigma / r_2^2$$

где  $r_1, r_2$  – мгновенные значения радиусов пузырьков. Предположим, что  $r_1 > r_2$ . Тогда  $P_{v1} < P_{v2}$ . Это означает, что скорость нагрева электролита на поверхности первого пузырька будет меньше, чем на поверхности второго, а перегрев жидкости на поверхности второго пузырька больше, чем на поверхности первого. В режиме взрывного кипения значение времени  $t_{кин}$  уменьшается с ростом мощности нагрева жидкости [11]. Следовательно, на поверхности пузырька с меньшим радиусом фазовый переход наступает при меньших значениях  $t_{кин}$  и раньше происходит электрический пробой газовой фазы. В результате скорость роста пузырька радиуса  $r_2$  будет больше скорости роста пузырька радиуса  $r_1$ . Таким образом, в процессе формирования многоочагового разряда происходит “выравнивание” радиусов плазменных пузырьков, а, следовательно, и мгновенных значений токов, протекающих через каждый металлический концентратор тока ( $i_k = V/R = 2V\pi\sigma r_k$ , где  $k$  – номер концентратора тока).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты: № 05-08-18145, № 06-02-17453).

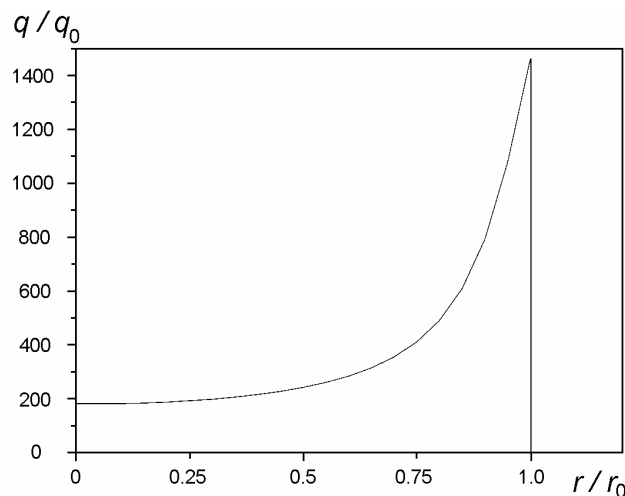


Рис. 1. Распределение мощности энергоснабжения вдоль радиуса в центральном сечении отверстия диафрагмы.  $L/R = 2$ ,  $r_0/d = 6.7$ ,  $R/r_0 = 20$ .

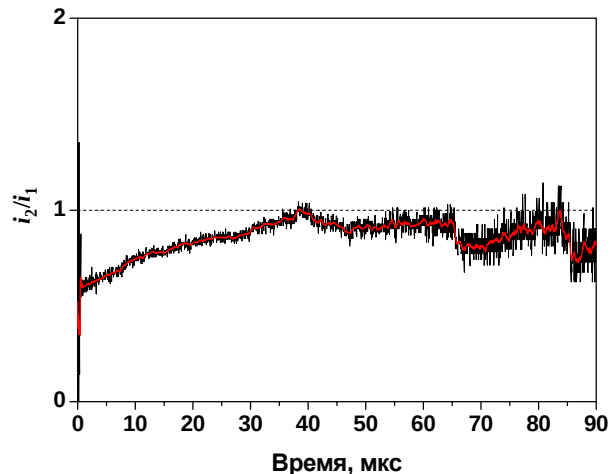


Рис. 2. Отношение мгновенных значений токов, протекающих через стальные КТ.  $r_1=0.85$  мм,  $r_2=0.6$  мм,  $V=2000$  В,  $\sigma=0.042$  Ом<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frungel F. High speed pulse technology. v.1, 1965, pp. 486-498
2. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Жуков А.И., Митрофанов В.В. Генерация и фокусировка ударно-акустических волн в жидкости многоочаговым электрическим разрядом. ЖТФ, 1999, т. 69, в. 4, с. 138-140
3. Katsuki S., Akiyama H, Aboud-Ghazala A, Schoenbach K.H. Parallel streamer discharge between wire and plane electrodes in water, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, v.9, no.4, 2002, pp. 498-506
4. Санкин Г.Н., Дрожжин А.П., Ломанович К.А., Тесленко В.С.. Многоочаговый электроразрядный диафрагменный генератор ударных волн в жидкости // Приборы и техника эксперимента, № 4, 2004, с. 114-118
5. Велихов Е.П., Ковалёв А.С., Рахимов А.Т.. Физические явления в газоразрядной плазме. М.: Наука, 1987, с. 53-54
6. Кульский Л. А., Савчук О. А., Дейнега Е. Ю. Влияние электрического поля на процессы стерилизации воды. - Киев: Наук. думка, 1980. - 125 с
7. Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В.. Пробой жидкости при импульсном напряжении / Под ред. проф., д. т. н. В.Я. Ушакова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005.- 488 с.
8. Теляшов Л.Л.. Особенности развития «беспробойного» разряда в жидкости. Электронная обработка материалов, № 2, 1989, с. 38-41
9. Тесленко В.С., Жуков А.И., Митрофанов В.В.. Многоочаговый электроискровой разряд в жидкости. Письма в ЖТФ, т. 21, в. 18, 1995, с. 20-26
10. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Санкин Г.Н.. Автоциклический кольцевой пробой с вынужденным коллапсом пузырьков. ПЖТФ, т. 32, в. 4, с. 24-31
11. Попель П.С., Павлов П.А., Скрипов В.П.. Экспериментальное определение температуры достижимого перегрева электролитов. Гидродинамика и теплообмен, 1974, с. 86-91