

03

Автоциклический кольцевой пробой в электролите с вынужденным коллапсом пузырьков

© В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Г.Н. Санкин

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск
E-mail: teslenko@hydro.nsc.ru

Поступило в Редакцию 5 сентября 2005 г.

Экспериментально исследован механизм развития автоциклических кольцевых пробоев в электролите при электрическом разряде в отверстии диэлектрической пластины. Показано, что причиной автоциклических пробоев в электролите является осесимметричный электрогидродинамический процесс с генерацией кольцевого пробоя-пузырька, который при расширении является размыкателем тока, а при захлопывании к оси отверстия кольцевым замыкателем тока с последующим кольцевым пробоем, и т.д. В целом формируется самонастраивающийся противофазный процесс динамики генерируемых пузырьков: каждый предыдущий пузырек захлопывается в поле давления от пробоя-пузырька последующего, с ускоренным коллапсом и дроблением.

PACS: 52.80.-s

В работе [1] было показано, что в электролите могут развиваться автоколебания тока, протекающего через отверстие диэлектрической диафрагмы. Причем наблюдаемые автоколебания тока имеют определенную область существования, зависящую от диаметра отверстия и подаваемого напряжения. Для выявления механизмов автоколебаний тока и для нахождения стабильных автоколебательных систем нами была проведена серия экспериментов с различными концентраторами тока. Осуществлялись одновременная регистрация тока и теневая кино-съемка гидродинамических процессов в области электрического пробоя. В результате этих исследований выяснилось, что каждый цикл пробоя и последующего расширения и коллапса пузырьков сопровождается комплексом нелинейных эффектов. Основные стадии этих эффектов представлены в данной работе.

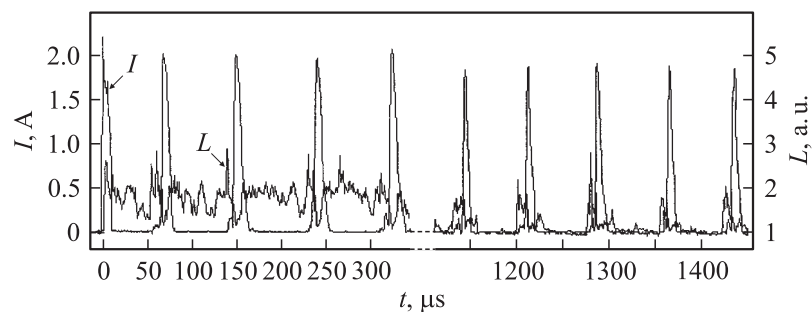


Рис. 1. Осциллограммы тока (I) и излучения света (L , а.е.) при циклическом кольцевом пробое.

Наиболее стабильные режимы автоколебаний тока в электролите были получены:

- 1) для концентраторов тока в виде отверстий в лавсановой и тефлоновой пленке с двумя удаленными ($l_1, l_2 > 30d$) металлическими электродами площадью $S > 100d^2$ (d — диаметр концентратора);
- 2) для концентратора тока в виде плоского металлического электрода, прижатого к круглой диафрагме ($l_1 = 0, l_2 = 20 \text{ mm}$);
- 3) для металлических концентраторов тока в виде нормальных срезов проволоки с диэлектрическим покрытием боковой поверхности и с удаленным противоположным плоским электродом ($S > 100d^2$) на расстоянии $l_2 > 30d$.

Для этих трех постановок представлены результаты экспериментальных исследований пробоев электролита и соответствующих электрогидродинамических процессов.

На рис. 1 представлены типичные осциллограммы тока (I) и излучения света (L), зарегистрированного с помощью ФЭУ-35, для рассматриваемых электрогидродинамических явлений.

На рис. 2, a, b , (a — вид сбоку, b — вид по нормали к отверстию) представлены отдельные кадры теневой съемки динамики электрогидродинамических процессов, происходящих в 5%-ном растворе поваренной соли на концентраторе тока в виде отверстия ($d = 0.6 \text{ mm}$, $U = 500 \text{ V}$, $l_1 = l_2 = 20 \text{ mm}$) в лавсановой пленке толщиной $50 \mu\text{m}$ в интервале первого цикла расширения и коллапса пузырька ($T_1 = 260 \mu\text{s}$). На рисунке схематично представлен отрезок осциллограммы тока с ука-

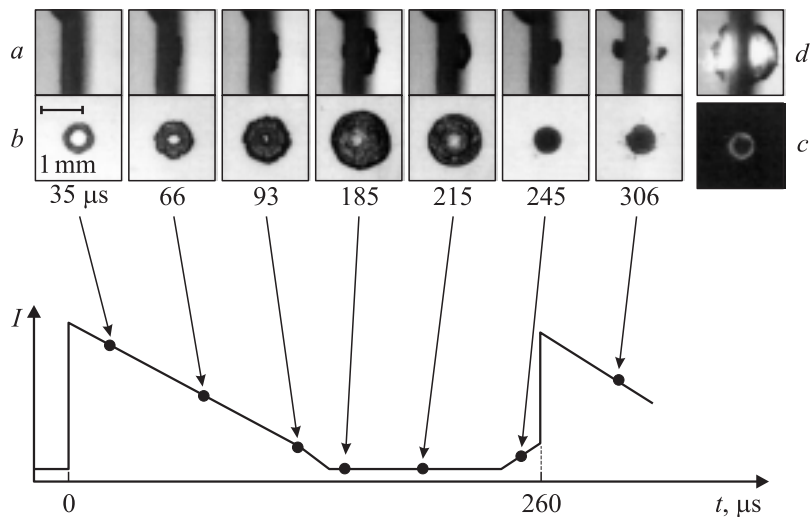


Рис. 2. Результаты фотосъемки электрогидродинамических процессов в 5%-ном растворе поваренной соли в отверстии ($d = 0.6$ mm) лавсановой пленки толщиной $50 \mu\text{m}$, с привязкой моментов съемки (t) к осциллограмме тока: a — теневая съемка пробоя-пузырька сбоку ($U = 500$ V), b — теневая съемка пробоя-пузырька спереди ($U = 500$ V), c — интегральное свечение в режиме автоциклических пробоев ($U = 500$ V), d — пробой в пузырьке ($U = 700$ V, $t = 218 \mu\text{s}$), соответствующий срыву автоциклических кольцевых пробоев.

занием моментов фотосъемки. На рис. 2, c представлен фотокадр интегрального свечения этого же автоциклического процесса ($d = 0.6$ mm, $U = 500$ V).

Из результатов фотосъемки и осциллографических измерений тока и свечения следует, что на границе диэлектрика происходит нагрев электролита с образованием светящейся плазмы (рис. 1, 2). В целом весь этот процесс соответствует определению пробоя жидкости как образования фазового разрыва в однородной среде в разрядном промежутке. Таким образом разрывом (breakdown) является образованный пузырек с последующими его пульсациями. В результате возникшего пробоя электролита по периметру отверстия образуется пузырек в виде тора, с последующим его расширением и трансформацией к

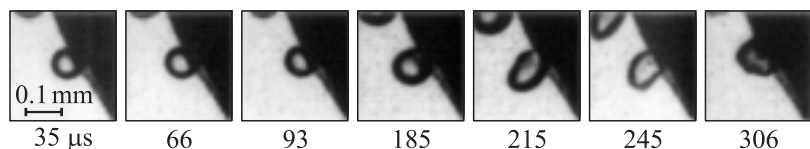


Рис. 3. Теневая съемка динамики пробных микропузырьков в поле пульсаций пузырька от кольцевого пробоя.

форме, близкой к эллипсоиду. В процессе расширения торообразный пузырек перекрывает токовый канал, ток обрывается. В этой стадии пузырек выполняет функцию прерывателя тока. Затем после достижения максимального размера ($D \approx 2-3d$) начинается стадия коллапса пузырька, при которой открывается токовый канал в виде „зазора“ между пузырьком и границей диэлектрика, и вновь осуществляется разряд с пробоем по периметру отверстия. Эта стадия коллапса пузырька соответствует процессу включения кольцевого токового канала.

В момент образования кольцевого зазора на границе диэлектрика происходит пробой электролита с образованием последующего пузырька-тора, который при своем образовании и расширении отделен жидкостью от предыдущего пузырька. В этот полупериод предыдущий пузырек находится в стадии захлопывания к оси отверстия, с дополнительным ускорением за счет осесимметричного потока жидкости от последующего пробоя-пузырька. Этот эффект был дополнительно проверен на пробных микропузырьках, находящихся в радиальном направлении от отверстия. Было обнаружено, что при расширении каждого тора-пузыря пробные пузырьки уменьшались в размерах в поле возникающего давления от расширяющегося тора-пузырька, а в начальной фазе его захлопывания пробные микропузырьки увеличиваются в размерах в направлении гидродинамического потока. На рис. 3 представлена динамика пробных микропузырьков, находящихся на расстоянии 1.2 mm от отверстия с кольцевым пробоем (кинограмма рис. 3 представлена в едином масштабе времени с кинограммой рис. 2, b).

Противофазная динамика предыдущего и последующего пузырьков от кольцевых пробоев обеспечивает отсутствие процессов слияния этих пузырьков и последующее „выталкивание“ остатков предыдущего

пузырька вдоль оси отверстия в виде облака мелких пузырьков. Такие электрогидродинамические циклы повторяются при падении напряжения на конденсаторе до уровня, соответствующего нижней границе области существования автоколебаний [1].

Динамика автоциклических процессов, происходящих и на границе металлических электродов с плоским круглым сечением (постановка 2, 3) [2], аналогична процессам при диафрагменном разряде. При этом пробой происходит также с образованием торообразного пузырька, с осесимметричным его захлопыванием вблизи электрода и с последующим кольцевым пробоем по периметру электрода. Особенностью экспериментов с металлическими концентраторами, в отличие от разряда на отверстии диэлектрической пластины в электролите, является несимметричность гидродинамического импульса от электрического пробоя. Остатки пузырьков от каждого предыдущего пробоя „выталкиваются“ вдоль оси электрода в направлении от электрода.

Отметим, что автоциклический процесс кольцевых пробоев разрушается при выходе параметров системы за пределы его существования „сверху“ или „снизу“ [1]. Ограничение по напряжению „снизу“ соответствует порогам развития кольцевых пробоев (например, для $d = 0.6 \text{ mm}$, $U_d = 100\text{--}200 \text{ V}$), а ограничение „сверху“ соответствует условиям развития последующего плазмообразующего канала внутри первого пузырька. На рис. 2, d представлен кадр срыва автоциклических процессов „сверху“, т. е. при увеличении напряжения на электродах до $U_u = 700 \text{ V}$. В этом случае развивается непрерывно плазмообразующий токовый канал между жидкими электродами непосредственно в первоначальном пузырьке. При этом регистрируется только один импульс тока.

Из данных экспериментов следует, что основной причиной развития автоциклического процесса с автоколебаниями тока является кольцевой пробой электролита на границе диэлектрика. Стабильность автоциклического процесса может нарушаться по ряду причин, приводящих к несимметричному образованию и схлопыванию пузырька. Основными среди этих причин являются: 1) неточность изготовления концентраторов тока, отклонение от геометрии плоского и круглого сечения, 2) изменение геометрии концентратора в процессе эксплуатации, разрушение диэлектрика вдоль круговой границы концентратора. Разрушение диэлектрика обуславливает процесс перехода кольцевого разряда в неоднородный кольцевой разряд, что ведет к образованию

неоднородного тора-пузыря, с последующей неустойчивой динамикой пульсации пузыря. Однако следует особо подчеркнуть, что заданные незначительные неустойчивости в начальной стадии кольцевого разряда, представленные, например, на фотокадрах 1, 2 и 3 (рис. 2, *b*), существенно не нарушают стабильность процесса в целом, что свидетельствует об устойчивости циклического процесса к незначительным отклонениям в начальных условиях.

Важной особенностью данного электрогидродинамического процесса является то, что каждый последующий пузырек не сливается с предыдущим. Это указывает на то, что каждый последующий кольцевой пробой развивается самостоятельно, не на границе предыдущего пузырька, как это можно было бы предполагать из общих концепций и теорий электрического пробоя жидкостей с пузырьками [2]. Следовательно, токовый нагрев жидкости с излучением света (рис. 1, 2) происходит в электролите на границе с диэлектриком в момент образования кольцевого „зазора“ в жидкости между предыдущим пузырьком и круговой кромкой отверстия в диэлектрической пластине, что соответствует начальной стадии включения тока между жидкими электродами и пробоем жидкости по периметру отверстия. По данным результатам можно сделать заключение, что кольцевой пробой, развивающийся по периметру концентраторов тока, происходит при значениях напряженности поля на границе диэлектрика $\sim 10^4 - 10^5$ V/cm. Плазмообразующий канал в каждом предыдущем пузырьке не может развиваться, так как напряженность поля на пузырьке для каждого цикла меньше на величину размера пузырька. И, как показывает опыт, только увеличение напряжения до верхней области существования циклического процесса приводит и к плазмообразующему пробоем газа внутри пузыря. По нашему мнению, кольцевой пробой в последующих циклах облегчается еще и за счет расширения микропузырьков, находящихся на границе диэлектрика, которые увеличиваются в размерах в начальной стадии захлопывания большого пузырька, т.е. в потоке жидкости, направленном по нормали к внешней границе захлопывающегося пузырька. Этот эффект предполагает, что в расширяющихся микропузырьках давление меньше, чем в большом захлопывающемся пузырьке, и этим фактом могут облегчаться условия ионизации газа внутри микропузырьков и инициироваться пробой в этих пузырьках в соответствии с законом Пашена [2]. В целом мы наблюдаем суперпозицию пробоев микропузырьков для каждого кольцевого пробоя электролита на границе диэлектрика. Аналогичная динамика пробоя происходит в электролите

на концентраторе тока в виде плоского металлического электрода, прижатого к круглой диафрагме (постановка 2). Циклические пробои развиваются в электролите по периметру металлического электрода с выше рассмотренной динамикой.

Отмеченные свойства циклических кольцевых пробоев и образуемых пузырьков с противофазной динамикой являются существенными в рассматриваемом процессе. Они могут быть использованы для самонастраивающегося усиления коллапса пузырьков, примененного в изучении проблем коллапса пузырьков, относящихся к проблемам свечения пузырьков при кавитации. Рассмотренный эффект стабильной циклическости пробоев-пузырьков может быть применен при моделировании динамики кооперативных процессов в гетерогенных системах и для генерации циклических акустических и ударных волн в конденсированных средах.

Выводы:

1) В данной работе экспериментально исследован эффект развития автоциклических кольцевых пробоев в электролите с противофазной динамикой образуемых пузырьков. Кольцевой пробой обеспечивает рождение пузырька в виде тора, с усилением и ускорением сжатия предыдущего пузырька гидродинамическим потоком от последующего кольцевого пробоя. При этом каждый расширяющийся пузырек включает ток, а каждый захлопывающийся пузырек включает ток, с последующим кольцевым пробоем.

2) Показано, что основой стабильности электрогидродинамических автоциклических процессов, протекающих в отверстии диафрагмы и на металлических электродах с плоским круглым сечением, является кольцевой пробой по периметру границы концентратора тока с диэлектриком как в начальной стадии, так и в последующих циклах.

3) Эффект автоциклическости кольцевого пробоя с противофазной динамикой образуемых пузырьков может быть использован в исследованиях проблем коллапса пузырьков.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05–08–18145) и СО РАН (грант № 123). В работе использовалась цифровая видеокамера PCO SensiCam, предоставленная Германской службой академических обменов (DAAD, грант № A/00/01480).

Авторы благодарны С.А. Ждану и М.Е. Топчиану за полезное обсуждение работы.

Список литературы

- [1] *Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Карташов А.М.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 20. С. 83–88, <http://www.sswsl.newmail.ru/publ/TeslenkoDK-TPL-2001-rus.pdf>
- [2] *Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В.* // Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 488 с.