

УДК 523+534+537

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ
НА КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРАХ ТОКА

В. С. Тесленко, Р. Н. Медведев, А. В. Зайковский

(Новосибирск, teslenko@hydro.nsc.ru)

Введение. В настоящее время все более актуальными становятся работы по проблемам взаимодействия плазмообразующих разрядов-пробоев с жидкостями [1]. Это связано с проблемами очистки водных ресурсов для социальной сферы и промышленности.

Ранее нами были исследованы процессы электрогидродинамических автоколебаний для N параллельно подключаемых круглых концентраторов тока диаметром D , расположенных друг от друга на расстояниях $r > 6D$, включая исследования в разных кюветах [2–4]. В данной работе осуществлена постановка экспериментов для сплошных линейных электродов шириной h , что соответствует N круглым концентраторам тока диаметром d , установленным в линию или кольцо на контактных расстояниях ($r = 0$, $h = d$).

В задачу экспериментов входило выявление устойчивости автоколебательных процессов для устройств, отличительных от известных, — круглых электродов и диафрагм.

Постановка экспериментов. На рис. 1 представлена принципиальная схема постановки экспериментов. Электроды 1, 2 располагались в непроводящей кювете 4 с электролитом по разные стороны от диафрагмы с отверстиями 3. Расстояние от диафрагмы до электродов составляло ≈ 50 мм. В качестве электродов использовались пластины из нержавеющей стали. Ток регистрировался осциллографом Tektronix TDS-210 (6), который подключался к шунту $R = 0,2$ Ом. Второй вход осциллографа 6 подключался к электродам 1, 2 через делитель для регистрации напряжения. Киносъемка гидродинамических процессов

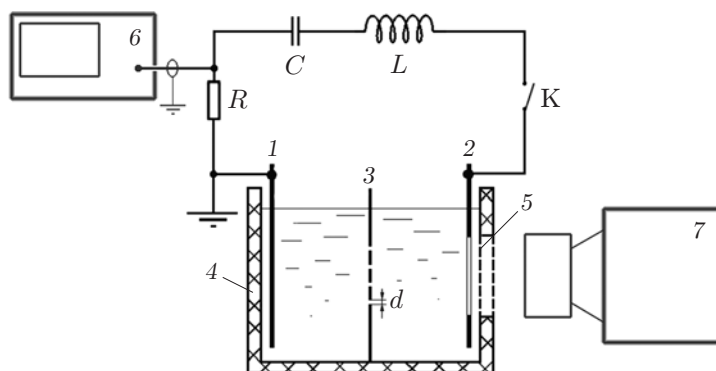


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

проводилась при помощи скоростной видеокамеры REDLAKE HG-LE (7) через окно из оргстекла 5 в кювете и круглое отверстие в электроде 2. Электрическая схема установки состояла из конденсатора $C = 200$ мкФ, который заряжался до напряжения $U_C = 50 \div 700$ В от внешнего источника; из переключаемой индуктивности $L = 0 \div 18$ мГн и управляемого электромагнитного ключа К. Собственная индуктивность установки составляла 3 мкГн. Регистрация светового излучения при разрядах осуществлялась при помощи ФЭУ-35.

Во всех экспериментах активное сопротивление электролитической ячейки находилось в области $R_h > 2\sqrt{L/C}$. Для регистрации динамики пробоев дополнительно регистрировали излучение с помощью ФЭУ-35. Для измерения импульсов давления на оси кольцевых концентраторов использовались турмалиновые датчики с разрешением 0,1 мкс.

Эксперименты выполнены в трех основных постановках (рис. 2), которые использовались при изучении механизмов развития электрогидродинамических автоколебательных процессов в электролитах:

А) для линейных металлических концентраторов тока длиной $l = 9,5$ мм, с шириной полосок $h = 0,17 \div 0,9$ мм (рис. 2,А);

В) для кольцевых металлических концентраторов тока внешнего диаметра $D = 3 \div 10$ мм, с шириной колец $h = 0,17 \div 0,9$ мм (рис. 2,В);

С) для кольцевых концентраторов тока в виде диафрагменных высечек в лавсановой пленке толщиной $\delta = 100$ мкм, $D = 6 \div 8$ мм, $h = 0,35$ мм (рис. 2,С), с отклонениями ширины щели по периметру $\pm 0,1$ мм.

Металлические концентраторы тока (постановки А и В) изготавливались из нержавеющей стали и заливались в эпоксидную смолу, затем делался шлиф с линейными и кольцевыми электродами в плоскости шлифа. Концентраторы тока подключались к полярности «+» подаваемого напряжения. Противоположным электродом являлась пластина из нержавеющей фольги, устанавливаемая на расстоянии $H \gg h$ (постановки А и С), или соосный с концентратором тока цилиндр (постановка В). В качестве электролита использовались водные растворы хлористого натрия концентрацией 1 %.

Результаты экспериментов. На рис. 3 представлены типичные осциллограммы тока и напряжения в режиме автоколебаний для кольцевых концентраторов тока без до-

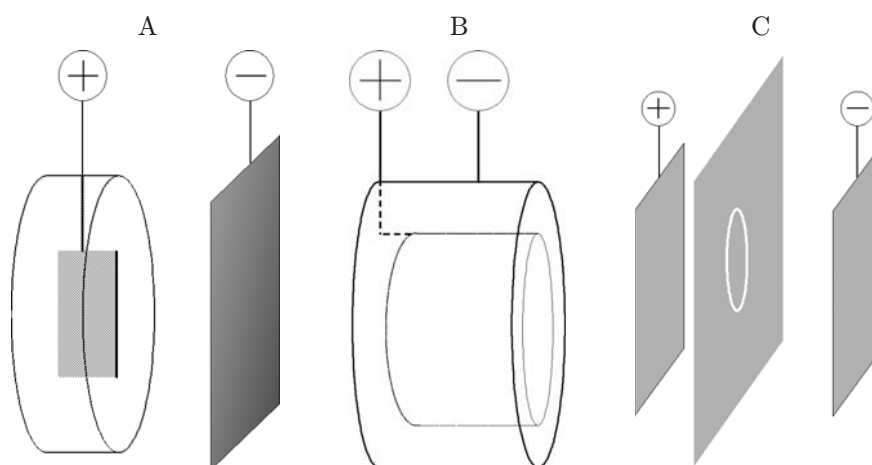


Рис. 2. Схемы постановки экспериментов:

А — линейный металлический концентратор тока, залитый в эпоксидную смолу, В — металлический кольцевой концентратор тока, залитый в эпоксидную смолу, С — диафрагменный концентратор тока в виде кольца

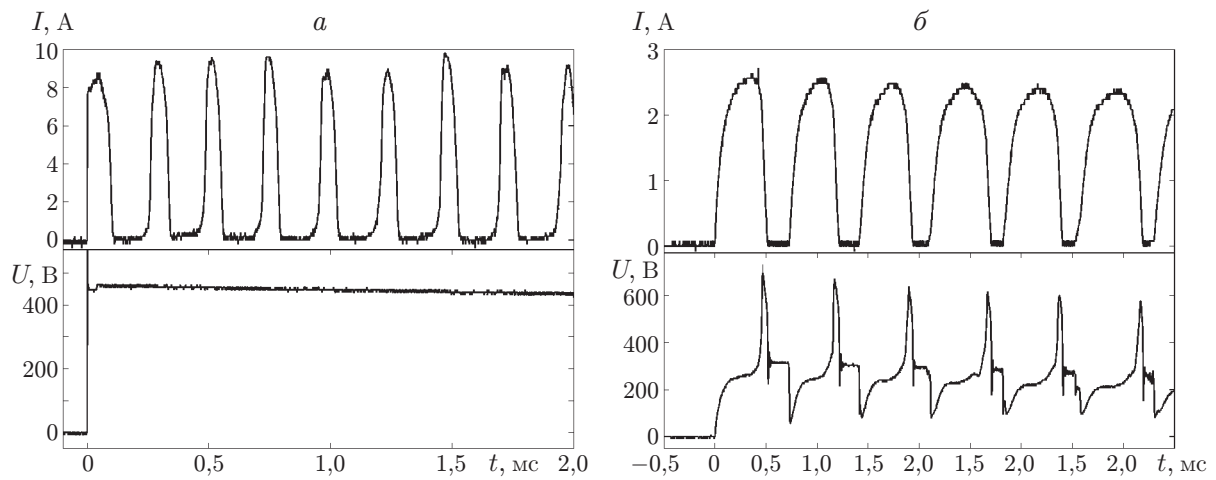


Рис. 3. Осциллограммы тока I и напряжения на электродах U :

a — разряд на кольцевом образце $D = 3$ мм, $h = 0,17$ мм без подключения дополнительной индуктивности ($L = 0$); b — разряд на таком же образце с подключением индуктивности $L = 7,7$ мГн

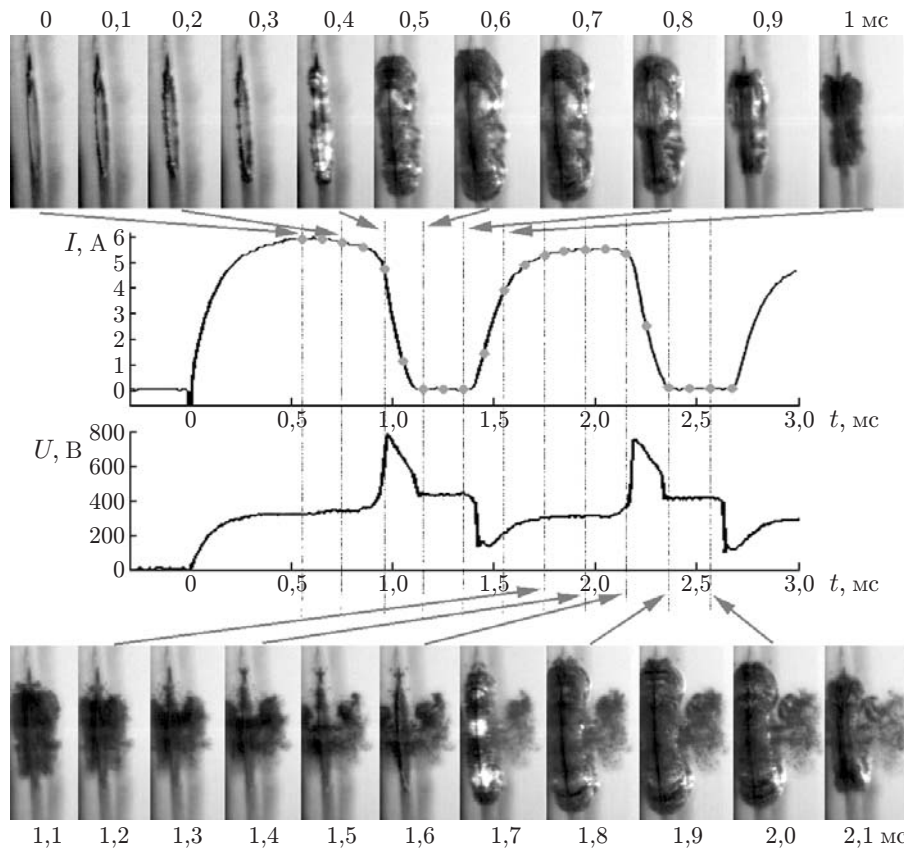


Рис. 4. Полутеневая киносъемка процессов, происходящих на кольцевом металлическом концентраторе тока внешнего диаметра $D = 6$ мм, с шириной кольца $h = 0,25$ мм, $L = 7,7$ мГн

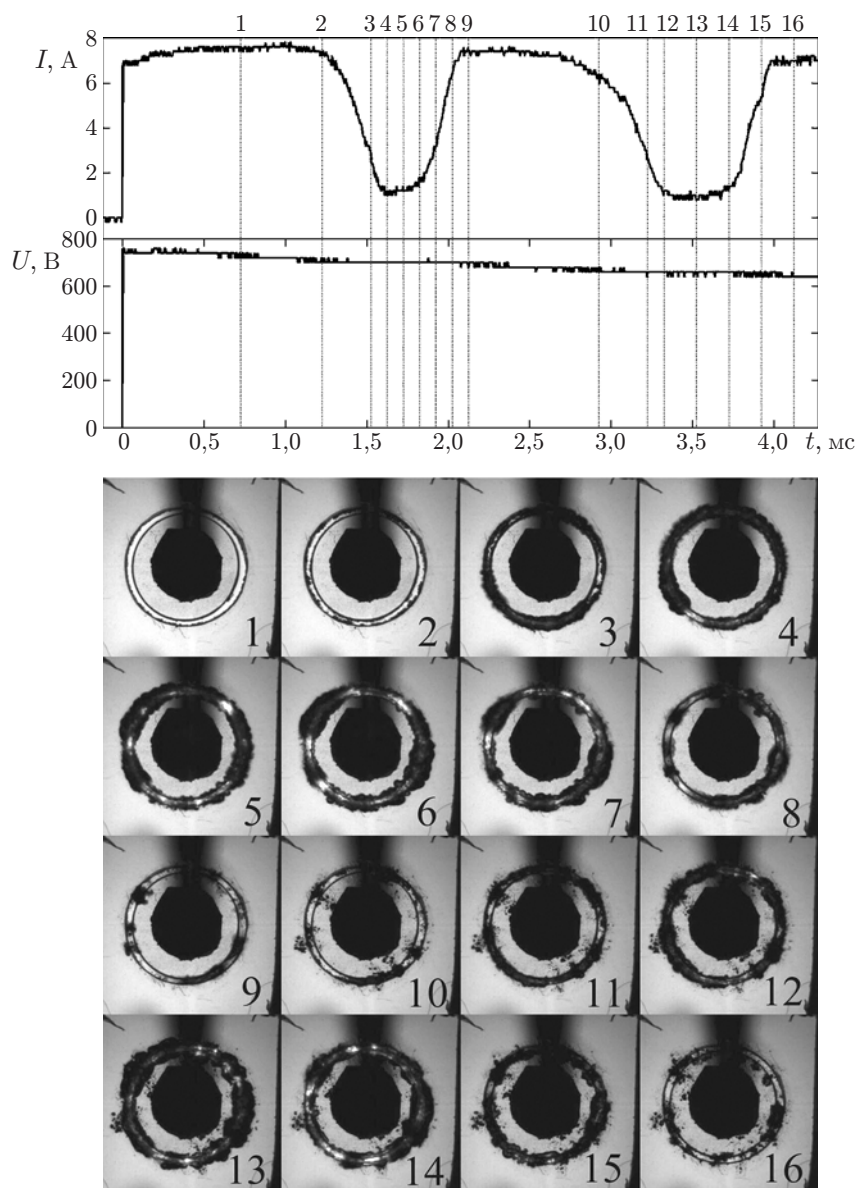


Рис. 5. Осциллограммы тока и напряжения и кадры киносъемки процесса без дополнительной индуктивности ($L = 0$)

полнительной индуктивности (рис 3, *a*) и с подключением дополнительной индуктивности $L = 7,7$ мГн (рис 3, *б*). Видно, что автоколебания тока на кольцевых концентраторах могут реализоваться и без включения дополнительной индуктивности в цепь разряда. Это важный результат, который комплексно исследуется в данной работе.

Известно [3, 4], что для случаев многоочаговых разрядов синхронные колебания пузырей на круглых концентраторах происходят только при включении в цепь дополнительной индуктивности [4]. Но было не известно, можно ли получить автоколебательный процесс для многоочаговых разрядов в случае исключения электрической обратной связи в виде индуктивности. Как показали осциллографические измерения тока (рис 3, *a*), это возможно для кольцевых концентраторов. Данный результат обусловил комплексную постановку экспериментов с использованием скоростной съемки.

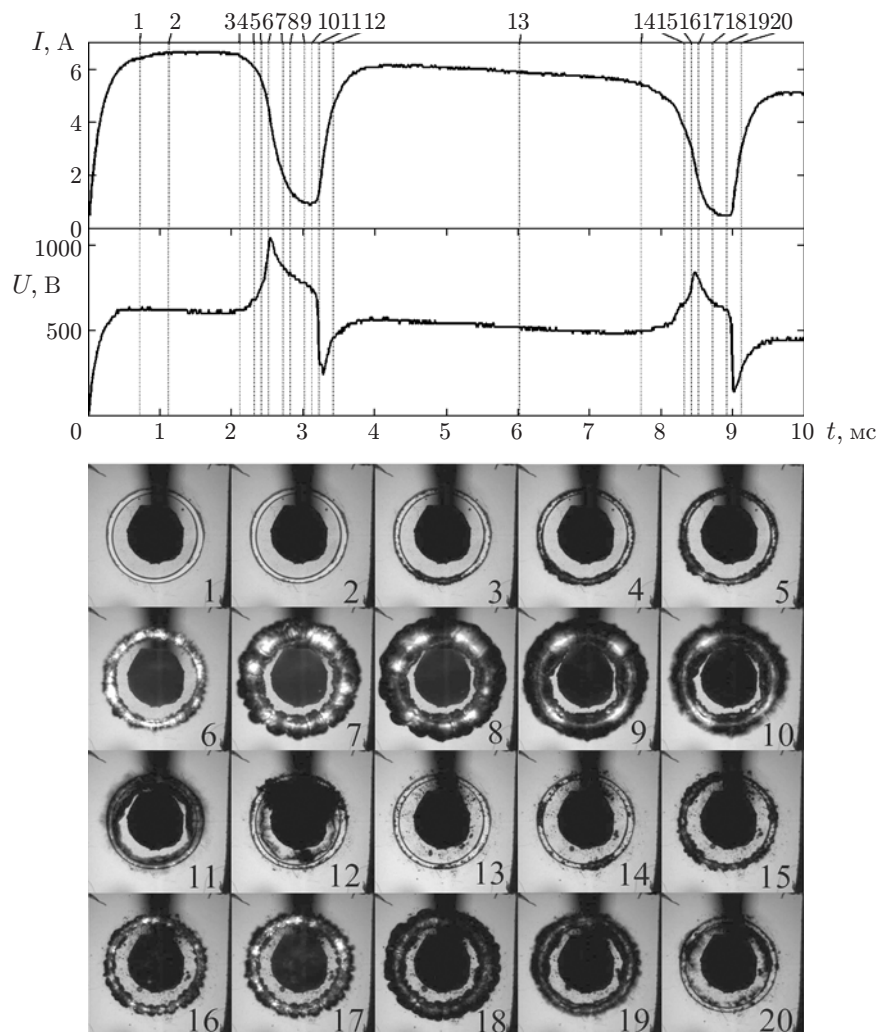


Рис. 6. Осциллограммы тока и напряжения и кадры киносъемки процесса с подключением дополнительной индуктивности $L = 18$ мГн

На рис. 4 представлены кадры скоростной киносъемки (полупрофиль) развития электрогидродинамических процессов на кольцевом концентраторе из нержавеющей стали внешнего диаметра $D = 6$ мм, с шириной кольца $h = 0,25$ мм ($L = 7,7$ мГн). Из этих кинокадров и осциллограмм следует, что рост торообразного пузыря начинается на стадии максимальных значений тока. Пробои между металлическим электродом и электролитом возникают на стадии падения тока и роста напряжения, генерируемого за счет процессов самоиндукции на дополнительной индуктивности. При этом независимо от высокой стохастичности пробоев по периметру кольца генерируются достаточно устойчивые торообразные пузыри.

Для выявления динамики электрогидродинамических процессов и механизмов устойчивости автоколебаний на концентраторах тока данных геометрий были осуществлены эксперименты с кольцевыми диафрагмами.

На рис. 5 приведены кадры скоростной киносъемки (постановка С, вид в фас) развития электрогидродинамических процессов на кольцевом диафрагменном концентраторе внешнего диаметра $D = 8$ мм, с шириной кольца $h = 0,35$ мм, без дополнительной ин-

дуктивности ($L = 0$), $U_C = 700$ В, а на рис. 6 — на таком же концентраторе ($D = 8$ мм, $h = 0,35$ мм) с подключением дополнительной индуктивности $L = 18$ мГн, $U_C = 800$ В. На рисунках представлены также соответствующие осциллограммы тока и напряжения на электродах.

Рис. 5, 6 позволяют проследить динамику электрогидродинамических процессов и их отличительные признаки. Так, в случае разряд-пробоев при наличии в цепи разряда дополнительной индуктивности (см. рис. 6) наблюдается более яркое свечение по периметру кольца, что соответствует более мощным пробоям, с образованием торообразного пузыря с максимальным диаметром кольца тора $D_b = (4 \div 5)h$. В случае же разряд-пробоев без индуктивности (см. рис. 5) максимальный диаметр пузыря находится в пределах $2h$. Прослеживается и различие в динамике пробоев. Для экспериментов с дополнительной индуктивностью (см. рис. 6) пробой развивается на стадии роста пузырьков, а в отсутствие дополнительной индуктивности (см. рис. 5) — на стадии схлопывания пузырьков в наименьшем сечении (кадр № 4). Из кинограмм и осциллограмм следует, что период пульсаций тока зависит от времени заполнения сечения диафрагмы пузырьками, от образования пузырьковых кластеров и их коалесценции. Время перекрытия сечения концентратора зависит от подводимой мощности.

На рис. 7 представлены экспериментальные результаты зависимости периодов пульсаций тока (соответственно и пузыря) от напряжения на конденсаторе для линейных ($l = 9$ мм) и кольцевых концентраторов ($D = 3$ мм) для случая $L = 7,7$ мГн. Из данных, приведенных на рисунке, следует, что с увеличением исходного напряжения на конденсаторе U_C период автоколебаний уменьшается и наименьшие периоды находятся в области напряжений $U = 450 \div 600$ В. Однако следует учитывать, что увеличение общей площади концентраторов приводит к увеличению энергозатрат на каждый период.

На рис. 8 представлены осциллограммы синхронной регистрации тока и акустических импульсов для кольцевого концентратора тока с параметрами $D = 6$ мм, $h = 0,25$ мм.

Анализ результатов. Из представленных экспериментальных результатов следует, что автоколебания тока развиваются как в случае включения в цепь дополнительной индуктивности L , так и без индуктивности. Из кинограмм и осциллограмм следует, что автоколебательный процесс развивается в результате взрывного вскипания жидкости. А наблюдаемые пробой в виде свечения являются сопутствующими явлениями, которые

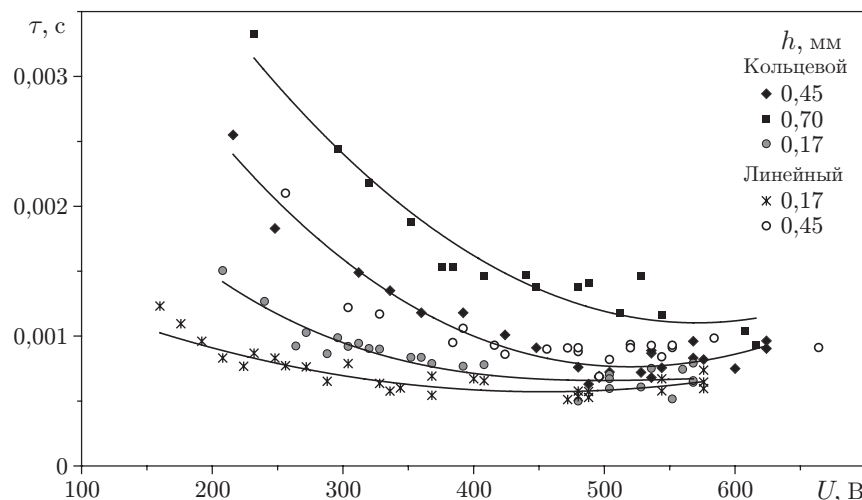


Рис. 7. Периоды автоколебаний для линейных ($l = 9$ мм) и кольцевых концентраторов тока ($D = 3$ мм) при варьировании напряжения и ширины h ($L = 7,7$ мГн)

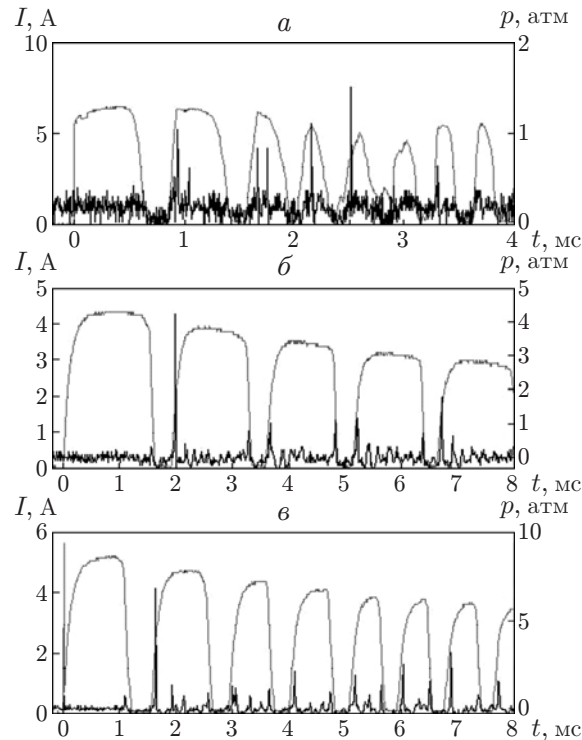


Рис. 8. Зависимости тока и давления от времени для кольцевого концентратора тока с параметрами $D = 6$ мм, $h = 0,25$ мм:

a — $U_C = 350$ В, $L = 0$, $б$ — $U_C = 350$ В, $L = 7,7$ мГн, $в$ — $U_C = 450$ В, $L = 7,7$ мГн

обеспечивают стабильность электрогидродинамических процессов для рассматриваемых концентраторов тока.

Важно отметить, что во всех проведенных экспериментах при работе системы в автоколебательном режиме пробой возникали после образования пузырьков. Пробой отождествлялись нами с фактом наличия свечения. Свечения наблюдались на границе и внутри пузырьков. При этом при наличии индуктивности импульсы свечения наблюдались на стадиях спада и минимальных значений тока.

Из результатов киносъемки и осциллографических измерений тока и напряжения установлено:

1) в варианте отсутствия в цепи дополнительной индуктивности пробой внутри пузырьков развивается на стадии схлопывания пузырьков при напряжении U_C ;

2) в варианте включения в цепь дополнительной индуктивности L первые пробой возникают и на стадии расширения пузырьков (на стадиях падения тока) при напряжении $U = U_C + U_L = U_C - L \sum_i \frac{dI_i}{dt}$. При этом на стадии развившихся автоколебаний пробой происходит на перетяжках кольцевых пузырей, что в дальнейшем обеспечивает выравнивание диаметрального сечения пузыря по длине.

Объяснить эти результаты можно исходя из энергетических позиций о порогах фазовых переходов и порогах пробоев жидкостей [5]. Так как мы имеем дело с циклическим размыкателем тока, т. е. систему с переменным сечением проводника тока, то рационально было бы пользоваться такими параметрами, как плотность тока j [А/см²] и удельная мощность P [Вт/см²]. В наших экспериментах мы можем регистрировать только напряжение U и ток I . Следовательно, для каждого момента времени мы знаем потребляемую

мощность на концентраторе $W = UI$. Для первого импульса тока мы можем определить удельную мощность $P = UI/S$ (S — площадь сечения концентратора тока). Например, для круглой диафрагмы толщиной $\delta = 20$ мкм с диаметром отверстия $d = 50$ мкм пределы развития автоколебаний находятся в интервале $P_0 = 5 \div 17$ Вт/см² [6]. Для последующих циклов эта величина становится трудно определяемой, так как в период последующего импульса тока отверстие частично перекрыто пузырьком и ток течет в щели между пузырьком и отверстием диафрагмы. При этом в обоих случаях, без индуктивности и с индуктивностью, пробои развиваются на стадии минимальных значений диаметра пульсации пузыря: $D_b \sim d$. Можно полагать, что площадь кольца жидкости между диафрагмой и пузырьком достигает минимальных критических значений и температура перегрева жидкости достигает порога ионизации пара на границе пузырька. Энергия, которая может выделяться в диафрагме $d = 50$ мкм ($\delta = 20$ мкм) за время импульса $\tau = 50 \div 100$ мкс, находится в пределах $Q \sim 100$ мкДж, что соответствует верхнему порогу автоколебаний и пробоем. Из этих данных оценка средней температуры нагрева воды за импульс (без учета теплопроводности и постоянства теплоемкости) дает значение $T \sim 10^3$ К. Этой температуры достаточно только для взрывного перегрева воды [7]. Мы же наблюдали преимущественно желтое свечение, соответствующее линиям натрия ($\lambda = 5890$ Å), что объясняется его минимальной энергией ионизации среди присутствующих веществ. В соответствии с этим оцениваемой температуры недостаточно для тепловой ионизации водного раствора поваренной соли. Так как порог ионизации натрия выше интегрально рассчитанной температуры, это означает, что энергия выделяется неравномерно по сечению отверстия и существуют зоны, в которых плотность тока выше той, которую мы рассчитываем из осциллографических данных [8].

Включение индуктивности в разрядную цепь, за счет генерации импульсов напряжения в цепи с амплитудой на ячейке: $U = U_C + U_L = U_C - L \sum_i \frac{dI_i}{dt}$, приводит к увеличению пиковой мощности на концентраторах тока, и пробои происходят на стадии роста пузырьков. Об этом свидетельствуют измеренные импульсы давления (см. рис. 8). Видно, что при увеличении напряжения U_C и индуктивности L амплитуда импульсов давления увеличивается.

В наших экспериментах превышение импульсного напряжения U над исходным напряжением U_C достигало значения $U/U_C = 5$. В этих случаях, возможно, пробои происходят не только по границе пузырьков, но и внутри пузырьков, так как может работать закон Пашена — зависимость порога пробоя $U_b = f(pL_E)$ от давления газа p и расстояния между электродами L_E . Из кинограмм мы видим, что пробои происходят в перетяжках пузыря, поэтому за параметр «расстояния между электродами» можно приблизительно принимать минимальный диаметр торообразного пузырька. На стадиях инерционного расширения пузыря [9] давление во всем пузыре может достигать $p \sim 10 \div 100$ Торр. Эти факты указывают на возможность дальнейших теоретических разработок моделей закона Пашена применительно к подобным схемам.

Показано, что стабилизирующим фактором образования единого коллапсирующего пузыря являются коронно-подобные разряды в пузырьках, которые развиваются при минимальных значениях параметра Пашена pD_b (p — давление в пузырьке, D_b — диаметр пузырька). В наших экспериментах область коронно-подобных пробоев находилась в интервале $U_C = 100 \div 700$ В. Величина нижних и верхних пробоев зависит от площади используемого концентратора тока.

Из рис. 7 следует, что при увеличении ширины концентраторов период пульсаций тока возрастает. Эту зависимость легко объяснить с помощью представленных на рис. 5, 6 кинограмм. Время перекрытия концентратора тока, как процесса образования единого пузыря,

зависит от степени перегрева жидкости, т. е. от подводимой мощности по всему сечению концентратора. С увеличением напряжения на конденсаторе U_C мы увеличиваем мощность и уменьшаем время нагрева жидкости. Включение в цепь разряда индуктивности L приводит к увеличению пиковой мощности $W = U^2/R_h$, что и обеспечивает более быстрое вскипание, уменьшение периода автоколебаний. Однако существует ограничение увеличения подводимой мощности, которое находится в интервале напряжений $U_C = 600 \div 700$ В. Это связано с развитием стационарного зажигания пробоя. Автоколебательный процесс исчезает. Мы называем это верхним порогом существования автоколебаний, т. е. когда температурный перегрев жидкости достигает области ионизационных процессов уже на первом импульсе тока.

Следует отметить главную особенность развития электрогидродинамических процессов на линейных и кольцевых концентраторах тока: образование пузырьков происходит так же, как и на круглых электродах (и отверстиях), если их установить контактно в полосу или кольцо. На первый взгляд, коронно-подобные разряды в пузырьках носят стохастический характер. Однако было замечено, что динамика последовательности пробоев во временном масштабе подчиняется закономерности по схеме «от меньших пузырьков к большим», т. е. первые пробои возникают в наименьших сечениях пузырьков. Например, для кольцевых концентраторов эти особенности наблюдаются в каждом цикле пульсаций генерируемых пузырей в виде тора. При этом за счет локальных пробоев обеспечивается стабильность автоколебательных процессов на неоднородных по сечению концентраторах. В этом и заключается основная суть механизма самосинхронизации электрогидродинамических автоколебательных процессов в электролите. Такой механизм реализуется благодаря наличию системы с обратной связью.

Из проведенных экспериментальных исследований следует, что стабильность автоколебательных процессов на кольцевых концентраторах выше, чем для N круглых концентраторов, разнесенных на расстояние $r \gg d$. Это связано со стабилизирующей ролью гидродинамических процессов, обусловленной коалесценцией растущих пузырьков, которые в начальной стадии рождаются на границах концентраторов стохастично.

Значения периодов автоколебаний для круглых, линейных и кольцевых концентраторов (при условии $d = h$) совпадают в пределах экспериментального разброса измеряемых параметров.

Наилучшая стабильность автоколебаний достигнута в интервале $350 \div 550$ В.

Выводы

1. Впервые получены режимы электрогидродинамических автоколебаний для металлических и диафрагменных кольцевых концентраторов тока, выполненных в виде полосок шириной h , длиной $l \gg h$ и колец диаметром $D \gg h$. Выявлено, что для линейных и кольцевых концентраторов тока период автоколебаний пропорционален ширине концентраторов и не зависит от их длины и периметра кольца.

2. Показано, что коалесценция пузырьков от стохастических разрядов-пробоев обеспечивает стабильность развития автоколебательных процессов в режиме фазовой синхронизации многоочаговых пробоев.

3. Выявлен механизм самосинхронизации электрогидродинамических процессов для линейных и кольцевых систем, который заключается в том, что опережающие пробои развиваются в наименьших щелевых зазорах, что обеспечивает выравнивание выделения энергии по периметру пузыря для каждого периода пульсаций.

4. Показано, что периоды акустических импульсов соответствуют периодам пульсаций тока и образуемых пузырей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bruggeman P., Leys Ch.** Non-thermal plasmas in and in contact with liquids // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2009. — V. 42. — 053001.
2. **Тесленко В. С., Дрожжин А. П., Карташов А. М.** Генерация автоколебательных процессов при диафрагменном разряде в электролите // Письма в ЖТФ. — 2001. — Т. 27. — С. 83. — <http://www.swsl.newmail.ru/>.
3. **Teslenko V. S., Medvedev R. N., Drozhzhin A. P.** Self-synchronization of electrohydrodynamic autooscillations during multichannel discharges in electrolyte // Techn. Phys. Lett. — 2007. — V. 33, N 10. — P. 833–836. — <http://www.swsl.newmail.ru/>.
4. **Medvedev R., Teslenko V., Drozhzhin A.** Electrohydrodynamic self-synchronization of self-oscillations on two diaphragm current concentrators in electrolyte // Phys. Lett. A. — 2008. — V. 373. — P. 102–106. — <http://www.swsl.newmail.ru/>.
5. **Teslenko V.** Electrical, laser and acoustic breakdown of a liquid, resemblance and distinctions // Proc. of the 14th Intern. Conf. on Dielectric Liquids, July 7–12 2002, Graz, Austria. — P. 163–166.
6. **Медведев Р. Н., Тесленко В. С., Дрожжин А. П.** Механизм автоколебательных процессов на диафрагменных концентраторах тока // Сб. тр. 8-й междунар. науч. конф. «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей». — СПб., 2006. — С. 139–142.
7. **Попель П. С., Павлов П. А., Скрипов В. П.** Экспериментальное определение температуры достижимого перегрева жидкости // Гидродинамика и теплообмен. — Изд-во АН СССР, Уральский научный центр, 1974. — С. 86–91.
8. **Дрожжин А. П., Карпов Д. И., Тесленко В. С.** Формирование многоочагового разряда в воде // Сб. тр. 8-й междунар. науч. конф. «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей». — СПб., 2006. — С. 164–167.
9. **Наугольных К. А., Рой Н. А.** Электрические разряды в воде. — М.: Наука, 1971.