

03

Электродинамические автоколебания в электролите на линейных и кольцевых концентраторах тока

© В.С. Тесленко, Р.Н. Медведев

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

Поступило в Редакцию 6 декабря 2010 г.

Впервые получены режимы электродинамических автоколебаний на линейных и кольцевых концентраторах тока, выполненных из металла и в виде диафрагм. Показано, что в таких системах прерывание тока обеспечивается за счет образования пузыря в виде цилиндра для линейных электродов и в виде тора для кольцевых концентраторов тока. Показано, что стабильность развития автоколебаний обеспечивается за счет гидродинамической коалесценции расширяющихся локальных пузырьков в единый пузырь с выравниванием его геометрии за счет пробоев в зазорах между пузырьками и диафрагмой.

В работах [1,2] были осуществлены режимы самосинхронизации электродинамических автоколебаний в электролите для круглых множественных концентраторов тока с сечением отдельных концентраторов до 2.3 mm^2 . Было показано, что самосинхронизация автоколебательных разрядов на множественных концентраторах тока с дисперсией по размерам до 1.5 mm^2 обеспечивается за счет генерации в цепи импульсов напряжения самоиндукции при включении в разрядную цепь дополнительной индуктивности. Возникает вопрос: можно ли получить автоколебательные режимы для больших площадей концентраторов тока?

В данной работе представлены результаты экспериментов, проведенных с линейными и кольцевыми концентраторами с сечением концентраторов тока до 12 mm^2 . Общая постановка экспериментов аналогична постановкам с точечными концентраторами [1,2]. Исследовались электродинамические процессы на концентраторах тока трех видов; 1) линейный металлический концентратор тока длиной $l = 9.5 \text{ mm}$, с шириной полоски $h = 0.17 - 0.9 \text{ mm}$; 2) кольцевые металлические

концентраторы тока с внешними диаметрами $D = 3 - 10$ mm, с шириной колец $h = 0.17 - 0.9$ mm; 3) концентратор тока в виде кольцевого отверстия в лавсановой пленке толщиной $\delta = 100$ μ m, $D = 6 - 8$ mm, $h = 0.35$ mm. Эксперименты проводились при напряжениях в интервале $U_C = 50 - 800$ V. Собственная индуктивность установки $L_0 = 3$ μ H. В разрядную цепь включались дополнительные контуры индуктивности $L = 0 - 32$ mH. В качестве электролита использовались водные растворы хлористого натрия с концентрацией 1%.

На рис. 1 представлены отдельные кадры киносъемки совместно с осциллограммами тока I , напряжения U и мощности P для случая развития электродинамических процессов на кольцевом диафрагменном концентраторе с внешним диаметром $D = 8$ mm ($h = 0.35$ mm), с дополнительной индуктивностью $L = 18$ mH ($U_C = 600$ V) и без дополнительной индуктивности ($U_C = 750$ V).

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты зависимости периодов пульсаций тока (соответственно и пузыря) от напряжения на конденсаторе U_C для линейных ($l = 9$ mm) и кольцевых концентраторов ($D = 3$ mm), выполненных из металла, для случая $L = 7.7$ mH. Из данных рис. 2 наглядно следует, что с увеличением исходного напряжения на конденсаторе период автоколебаний уменьшается, и наименьшие периоды находятся в области напряжений $U = 450 - 600$ V.

Отметим, что во всех проведенных экспериментах при работе системы в автоколебательном режиме пробой возникали после образования пузырьков, в периоды уменьшения токового канала и регистрируемого тока. Области пробоев определялись по цветным кинограммам как области красного и желтого свечения. Для черно-белых рисунков (рис. 1, *a, b*) на части кадров области свечения отмечены стрелками. Области свечения наблюдались как точно, так и по секторам на всем сечении диафрагмы h , например $t = 1.6$ ms (рис. 1, *b*), так и с сечениями $> h$ (рис. 1, *a*). Оценочный расчет осредненной пороговой удельной мощности для наблюдаемых пробоев составлял ~ 100 kW/cm². В отсутствие индуктивности свечение наблюдается на стадиях минимального тока и последующего его роста. А при наличии индуктивности импульсы свечения наблюдались на стадиях падения тока.

Из экспериментальных данных следует, что периоды увеличения тока соответствуют открытию сечения кольца, а периоды уменьшения тока соответствуют перекрытиям сечения кольца пузырьками и затем

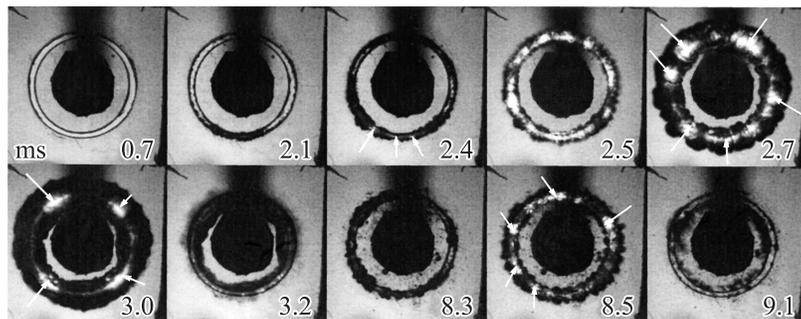
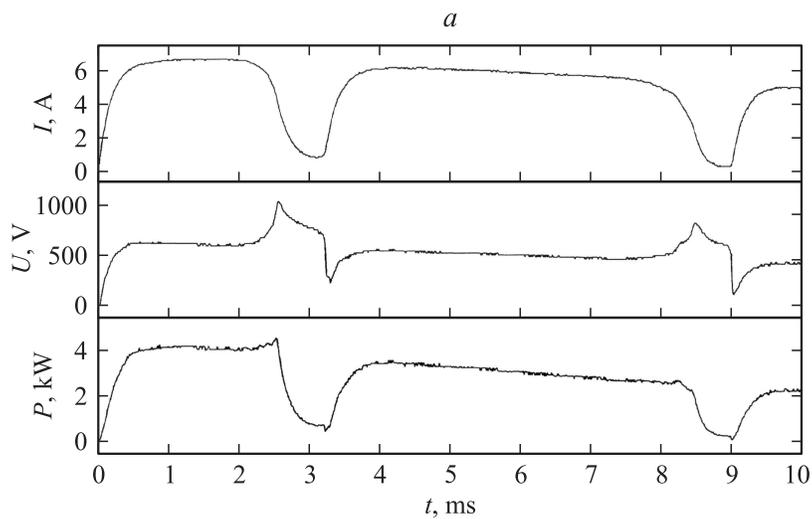


Рис. 1. Осциллограммы тока, напряжения и мощности совместно с кинокадрами электрогидродинамических процессов на кольцевом диафрагменном концентраторе с внешним диаметром $D = 8 \text{ mm}$ ($h = 0.35 \text{ mm}$): *a* — для индуктивности $L = 18 \text{ mH}$, *b* — без дополнительной индуктивности ($L = 0$).

единым торообразным пузырьком. При этом в периоды существования пузырьков наблюдаются пробои внутри пузырьков. Это, очевидно, связано с образованием обстрителей (перетяжек) из электролита на границе диафрагмы между диафрагмой и пузырьком. В периоды

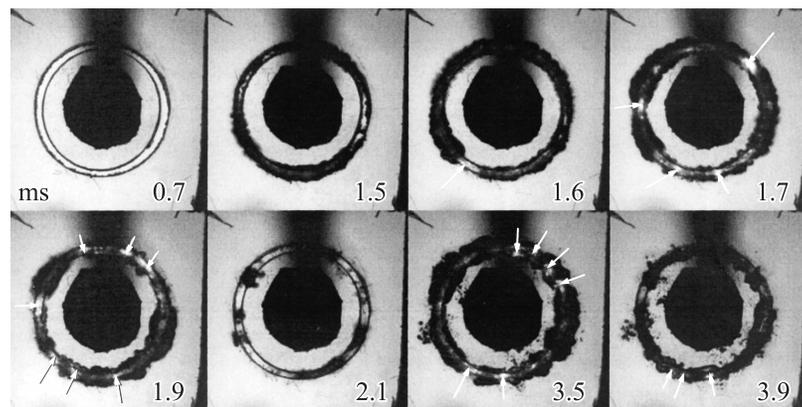
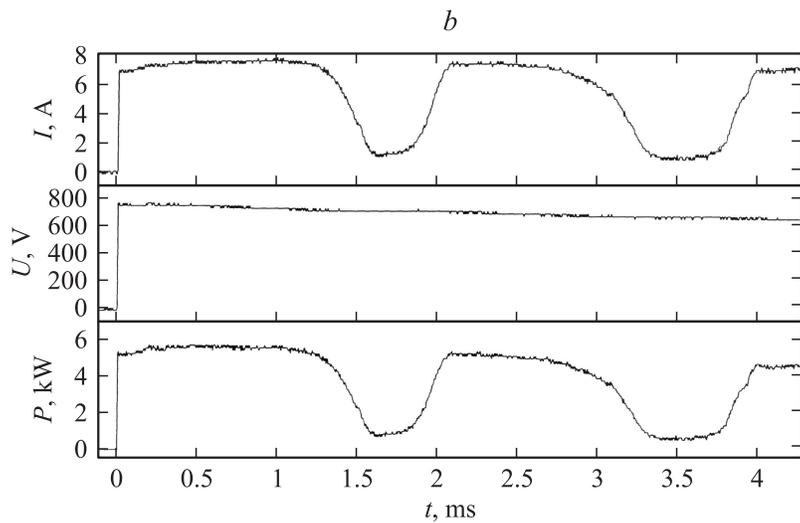


Рис. 1 (продолжение).

спада тока области свечения (пробои) диаметрально увеличиваются, и диаметр тора растёт (рис. 1, *a*). Для круглых отверстий в диафрагме эти обострители можно представить в виде шейки на границе между пузырьем и диафрагмой. А для линейных и кольцевых отверстий в

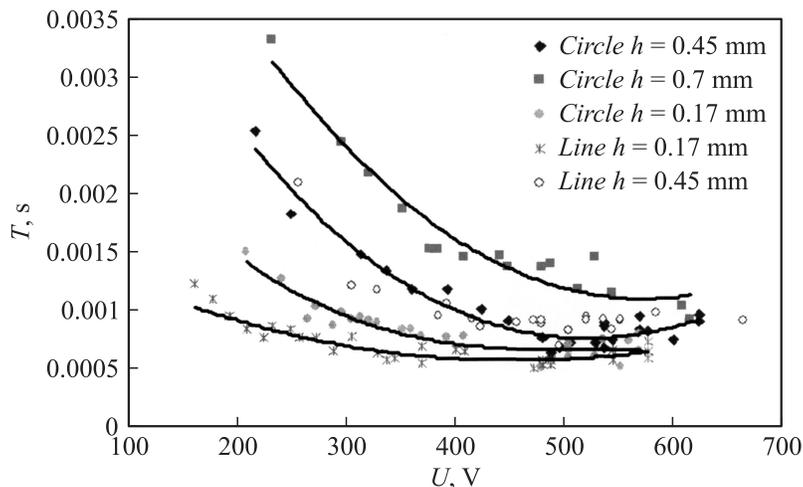


Рис. 2. Зависимости периода автоколебаний для линейных ($l = 9 \text{ mm}$) и кольцевых концентраторов тока ($D = 3 \text{ mm}$) от напряжения для различной ширины концентраторов тока h , выполненных из металла, $L = 7.7 \text{ мН}$.

диафрагме это клиновидные обострители с минимальными сечениями на границе кольца, с минимальным зазором между жидкими электродами на толщину диафрагмы. Эта гипотеза подтверждается тем, что мы наблюдаем пробой вначале на границе в сечении диафрагмы. Для вариантов с дополнительной индуктивностью область свечения увеличивается за счет генерации напряжения на ячейке (рис. 1, *a*) за счет самоиндукции. При этом жидкостные конусообразные обострители могут локально взрываться, как водные пленки на поверхности лавсановой диафрагмы. За счет этих взрывов-пробоев увеличивается общий объем кольцевого пузыря, что отслеживается на кинограммах. Так как мы имеем дело с переменным сечением проводника тока (электролит), то рационально было бы пользоваться параметром плотности тока j [A/cm^2] и удельной мощности p [W/cm^2]. В наших экспериментах мы можем регистрировать только напряжение U и ток I . Для первого импульса тока мы можем определить удельную мощность, например: для круглой диафрагмы толщиной $\delta = 20 \mu\text{m}$ с диаметром отверстия $d = 50 \mu\text{m}$ пределы развития автоколебаний находятся в интервале

$p_0 = 5-17 \text{ kW/cm}^2$ [3]. 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 мы наблюдаем, что для случаев как без индуктивности, так и с индуктивностью пробой развивается на стадиях значений диаметра пульсации пузыря $D_b \sim d$ (и для $h = d$). Можно полагать, что площадь кольца жидкости между диафрагмой и пузырьком достигает минимально критических значений и что температура перегрева жидкости достигает порога ионизации пара на границе пузырька. Например, энергия, которая может выделиться в отверстии диафрагмы с $d = 50 \mu\text{m}$ (толщиной $\delta = 20 \mu\text{m}$) за время импульса $\tau = 50-100 \mu\text{s}$, находится в пределах $Q \sim 100 \mu\text{J}$, что соответствует верхнему порогу автоколебаний и пробоя. Из этих данных оценка средней температуры нагрева воды за импульс, без учета теплопроводности и при постоянной теплоемкости, дает значение $T \sim 10^3 \text{ K}$. Этой температуры достаточно только для взрывного перегрева воды [4].

Можно считать, что стабилизирующим фактором образования единого коллапсирующего пузыря являются короноподобные разряды в пузырьках, которые развиваются при минимальных значениях параметра Пашена Pd (P — давление в пузырьке, d — диаметр пузырька). В наших экспериментах область короноподобных пробоев находилась в интервале $U_C = 100-700 \text{ V}$. Величины нижнего и верхнего значений пробоев зависят от площади используемого или динамически формируемого концентратора тока. Например, для кинограммы рис. 1, b пробой в пузырьке происходит при напряжении $U_C = 700 \text{ V}$ при этом максимальное поле в пузырьке между жидкостными электродами может достигать $\approx 70 \text{ kV/cm}$.

Из данных рис. 2 следует, что при увеличении ширины концентраторов период пульсаций тока возрастает. 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 индуктивности L приводит к увеличению пиковой мощности, что и обеспечивает более быстрое образование пузырька.

Динамика последовательности пробоев во временном масштабе подчиняется закономерности по схеме „от меньших сечений к большим“, т. е. первые пробои возникают в наименьших токовых сечениях концентраторов тока и между пузырьками. Например, на представленных кинокадрах видно, что первые пробои происходят в нижней части сектора в период захлопывания ранее образованной и слившейся цепочки пузырьков, т. е. в зазоре между пузырьками. Затем в такой же динамической последовательности пробои происходят в других частях кольцевой диафрагмы. Для кольцевых концентраторов эти особенности наблюдаются в каждом цикле пульсаций генерируемых пузырей в виде торов. При этом за счет локальных пробоев обеспечивается стабильность автоколебательных процессов на неоднородных по сечению концентраторах.

Из проведенных экспериментальных исследований следует, что стабильность автоколебательных процессов на кольцевых концентраторах выше, чем для N круглых концентраторов, разнесенных на расстояния $l \gg d$. Это связано со стабилизирующей ролью гидродинамических процессов, обусловленной коалесценцией растущих пузырьков и короноподобными разрядами, возникающими вдоль пленочных перетяжек между пузырьками и диафрагмой в периоды их расширения и схлопывания. Значения периодов автоколебаний для круглых, линейных и кольцевых концентраторов (при условии $d = h$) совпадают в пределах экспериментального разброса измеряемых параметров. Наилучшая стабильность автоколебаний достигалась в интервале 350–550 В.

Таким образом, впервые получены режимы электрогидродинамических автоколебаний на линейных и кольцевых концентраторах тока, выполненных из металла и в виде диафрагм.

Показано, что фазовая самосинхронизация размера пузырька по периметру концентратора обеспечивается за счет пробоев на границах пузырьков, в зазорах между пузырьками и диэлектриком, что является стабилизирующим фактором образования однородных по размеру цилиндрических и торообразных пузырей.

Авторы благодарны А.П. Дрожжину, А.Л. Куперштоху за полезные обсуждения результатов работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 10-08-00788.

Список литературы

- [1] *Тесленко В.С., Медведев Р.Н., Дрожжин А.П.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 19. С. 55–63.
- [2] *Medvedev R., Teslenko V., Drozhzhin A.* // Phys. Lett. A. 2008. V. 373. P. 102–106.
- [3] *Медведев Р.Н., Тесленко В.С., Дрожжин А.П.* // Сб. трудов VIII Междунар. науч. конф. „Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей“. СПб., 2006. С. 139–142.
- [4] *Попель П.С., Павлов П.А., Скрипов В.П.* // Гидродинамика и теплообмен: Сб. ст. Изд-во АН, Уральский науч. центр, 1974. С. 86–91.