

Формирование газовых полостей в водно-солевом растворе в режиме автоколебаний тока при близких к критическому значению напряжениях

*В.О. Нехорошев**, *А.В. Болотов*, *Ю.Д. Королев*, *Н.В. Ландль*, *О.Б. Франц*,
В.Г. Гейман, *И.А. Шемякин*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**nvo@lnp.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Исследуется динамика формирования наполненных паром пузырьков, возникающих при разряде электрической емкости через электролит при положительной полярности активного электрода. Электродная система относится к частному случаю геометрии острие-плоскость, когда длина активного электрода нулевая. Показано, что при напряжении на межэлектродном промежутке 500 В наблюдаются автоколебания тока. Присутствует корреляция между формой тока и звуковой волной от колебания жидкости, регистрируемой датчиком давления. В моменты наступления и прекращения полного экранирования активного электрода зажигается искровой разряд вдоль поверхности изолятора.

Ключевые слова: ток через электролит, искровой разряд, автоколебания, акустическая волна.

1. Введение

В настоящее время значительный интерес вызывают разряды в жидкостях, как с точки зрения практического применения, так и понимания физики происходящих там процессов. Причем физика разрядов в непроводящей жидкости существенно отличается от процессов в проводящей среде, например, в электролитах. Текущее состояние исследований и соответствующая терминология представлены в некоторых обзорных публикациях [1–3].

Важно помнить, что под разрядом в проводящей жидкости подразумеваются разряды в газовых пузырьках, которые образуются в предпробойной стадии или искусственно создаются на поверхности металлического электрода или в объеме жидкости. Разряд может произойти между металлическим электродом и внутренней поверхностью окружающего его пузырька при условии приложения достаточной разности потенциала между ними. Разряд может быть, как объемным, так и поверхностным. Последнее особенно вероятно при наличии твердого изолятора, разделяющего металлический и жидкий электроды.

Существующий недостаток знаний об особенностях образования наполненных газом пузырьков внутри проводящей жидкости при прохождении через нее электрического тока, а также о механизмах последующего развития разряда в пузырьках нуждается в фундаментальном исследовании всех этих вопросов.

Исследования показали, что газовые микропузырьки и тонкие слои пара на поверхности металлического электрода появляются в зазоре при напряжении около нескольких сотен вольт [4, 5]. Пробой происходит, когда напряжение на слое достигает определенного порогового значения V_{cr} [5, 6]. Значение V_{cr} обычно соответствует минимуму кривой Пашена. В зависимости от внешних условий импульсный разряд может проявляться в виде микроискрового или тлеющего разряда [4, 6, 7].

В настоящей статье обсуждаются экспериментальные данные по исследованию процесса формирования и исчезновения газовых полостей в условиях, когда потенциал активного электрода положителен, а напряжение на межэлектродном промежутке меньше критического.

2. Экспериментальная установка

На Рис. 1 приведено схематическое изображение экспериментальной установки. Смонтированный на диэлектрической крышке 1 электродный узел погружался в заполненную трехпроцентным раствором соли NaCl в дистиллированной воде (электролит) диэлектрическую камеру 2, имеющую форму цилиндра с внутренним радиусом 85 мм.

Разрядный промежуток располагался между активным электродом (анодом) 3 и обратным электродом (катодом) 4, расстояние между электродами составляло 10 мм. Анод представлял собой отрезок коаксиального кабеля РК75-9-13 с медной жилой обрезанной заподлицо с изоляцией и площадью торца 1.43 мм^2 . Катод в виде шарового сегмента диаметром 35 мм и высотой 5 мм был изготовлен из латуни. Ток $i(t)$, проходящий через межэлектродный зазор и обратный токопровод 5, регистрировался посредством низкоомного шунта R_s с сопротивлением 0.01 Ом . Напряжение на зазоре измерялось при помощи высоковольтного пробника Tektronix P6015A осциллографом TDS2024B.

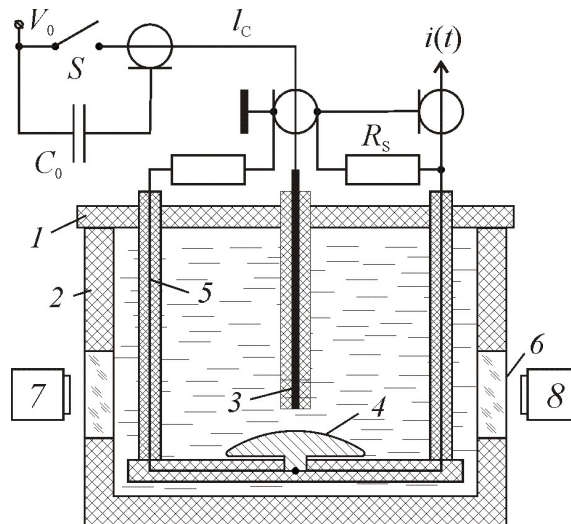


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – крышка для монтажа электродной системы, 2 – контейнер, 3 – активный электрод, 4 – обратный электрод, 5 – обратный токопровод, 6 – кварцевое окно, 7 – CCD камера, 8 – ФЭУ.
 $C_0 = 40 \text{ мкФ}$, $V_0 \leq 500 \text{ В}$, $R_s = 0.01 \text{ Ом}$.

Камера 2 была оснащена шестью кварцевыми окнами 6, через которые производилось фотографирование газовых полостей посредством CCD камеры SensiCam 7 и регистрация свечения разряда при помощи ФЭУ 8. Кроме того, напротив одного из окон устанавливался датчик звукового давления (электретный микрофон). Для получения нужной освещенности при короткой экспозиции съемки межэлектродный зазор подсвечивался светодиодным светильником мощностью 100 Вт .

3. Результаты экспериментов

При протекании тока через проводящую жидкость вследствие ненулевого сопротивления среды происходит ее нагрев. Если вкладываемой энергии достаточно, то нагрев жидкости может приводить к ее кипению с образованием наполненных паром пузырей. Пузыри возникают, прежде всего, в местах наибольшей плотности тока. В нашем случае, это области располагаются непосредственно вблизи торца поверхности активного электрода. При дальнейшем нагревании число первоначально возникающих микроскопические пузырьков нарастает, их размер увеличивается: микроскопические пузырьки превращаются в макроскопические. Последние сливаются с соседними пузырьками, формируя монопузырь. Раздуваясь, пузырь занимает все большую часть торцевой поверхности электрода, блокируя протекание тока. Если пузырь начинает закрывать всю поверхность электрода, наступает полная экранировка электрода и ток через среду либо существенно уменьшается, либо полностью прекращается.

Вследствие тепловой конвекции область внешней границы монопузыря, представляющая из себя поверхность кипения, начинает уменьшаться, и пузырь начинает сдуваться. Кроме

того, силы поверхностного натяжения стремятся придать пузырю сферическую форму. Это приводит к уменьшению области контакта пузыря с изолятором на торце электрода. Когда границы пузыря смещаются с поверхности изолятора активного электрода на торцевую поверхность электрода, режим экранировки прекращается, и восстанавливается токоперенос с торца электрода. Если напряжение на зазоре остается достаточным, то через некоторое время ситуация с образованием новых пузырьков и последующая экранировка электрода тока новым монопузырем повторяется. Таким образом, подбирая нужное напряжение для соответствующей конструкции активного электрода, можно получить режим автоколебаний тока в среде.

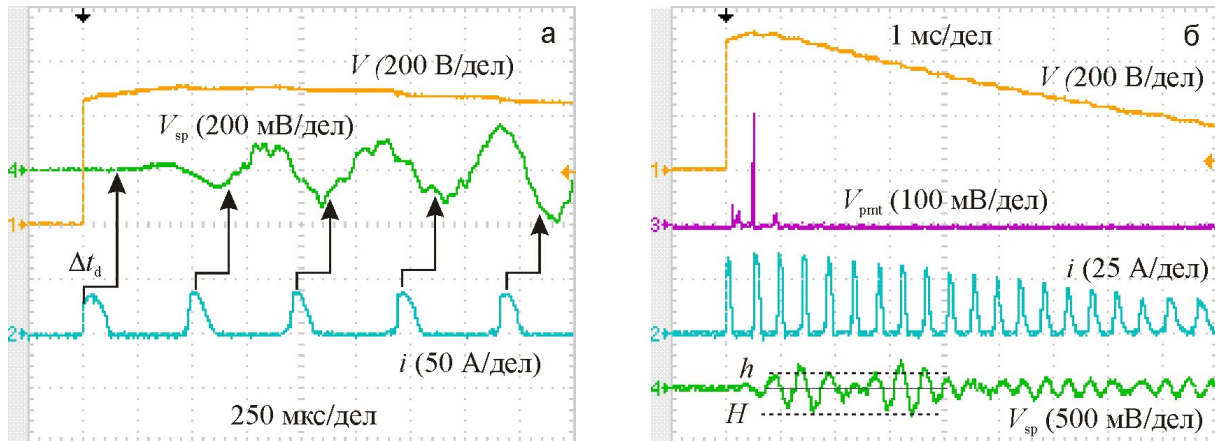


Рис. 2. Осциллограммы напряжения V , тока i , сигнала ФЭУ V_{pnt} и сигнала датчика давления V_{sp} . Стрелки указывают на смещение сигнала датчика давления от тока. $V_0 = 500$ В.

На Рис. 2а приведены осциллограммы напряжения на разрядном промежутке V и тока в промежутке i , совместно с сигналом датчика давления V_{sp} и сигнала с ФЭУ V_{pnt} . После замыкания ключа S (Рис.1) к промежутку прикладывается напряжение $V_0 = 500$ В. Отметим, что после достижения максимального значения напряжение на промежутке в течение 2 мс практически не изменяется. Поскольку электродная система помещена в проводящую среду, ток в промежутке появляется одновременно с приложением напряжения. Из осциллограмм видно, что протекание тока в промежутке имеет пульсирующий характер. В соответствии с механизмом, описанным выше, протекание тока через электролит приводит к закипанию электролита и появлению монопузыря и экранировке активного электрода. В результате через примерно 150 мкс после приложения импульса напряжения к промежутку ток прекращается. Спустя 300 мкс монопузырь начинает сдуваться, ток в промежутке начинает резко возрастать. Более детально процесс экранировки и прерывания тока в промежутке описан ниже.

Сигнал датчика давления V_{sp} хорошо коррелирует с поведением тока. Причем изменение звукового давления начинает регистрироваться спустя время задержки $\Delta t_s \approx 150$ мкс после начала регистрации тока. Задержка обусловлена суммой времени прохождения звуковой волны в жидкости от активного электрода через электролит, кварцевое окно и воздушный промежуток до места размещения мембраны датчика. Видно, что максимумы значения тока примерно соответствуют минимумам давления. Давление начинает нарастать в момент, когда начинается кипение жидкости, сопровождающаяся увеличением числа и размеров пузырьков пара. Это давление достигает максимума во время наибольшего расширения монопузыря, соответствующего примерно середине интервала полной экранировки электрода. Далее, пузырь начинает сдуваться и давление начинает уменьшаться.

На Рис. 2б хорошо видны биения давления, возникающие при интерференции звуковых волн. Действительно, на звуковую волну, приходящую на расположенный за одним из кварцевых окон датчик от расширения или сжатия монопузыря всегда накладывается

отраженная от противоположного кварцевого окна волна. Местом возникновения звуковой волны является ось, проходящая через разрядный промежуток. Для наложения на прямую волну отраженной, последней следует преодолеть расстояние между противоположно расположенными окнами $d = 160$ мм, которое звук проходит в электролите примерно за $\Delta t_r \approx 50$ мкс. Таким образом, датчик давления в любой момент регистрирует суперпозицию прямого и отраженного сигнала, сформированного ранее на время Δt_r . На Рис. 2б хорошо видно, что частота колебаний тока и связанным с ним звуковых волн немного изменяется, что дает возможность наблюдения биений.

Если H – суммарная амплитуда биений, а h – разностная, а A_1 и A_2 – амплитуды прямой и отраженной волн, то известно, что:

$$\begin{cases} H = A_1 + A_2 \\ h = A_1 - A_2 \end{cases} \quad \text{или} \quad \frac{A_1}{A_2} = \frac{H + h}{H - h}.$$

Оценивая по Рис. 2б $H \approx 230$ и $h \approx 140$, можно получить, что звуковая волна ослабляется при отражении примерно в 1.4 раза. Поэтому, начиная с 200 мкс датчик давления регистрирует наложение прямой звуковой волны и обратной волны, ослабленной приблизительно в полтора раза и с запаздыванием примерно на 50 мкс.

В ходе экспериментов в межэлектродном промежутке при помощи скоростной ССД-камеры проводились съемка динамики пузырей с экспозицией 10 мкс. Для обеспечения удовлетворительной освещенности такого рода объекта применялась подсветка светодиодным светильником. Понятно, что в данных условиях регистрировать сигнал от ФЭУ возможности не было. Повторяемость осциллограмм при одинаковом начальном напряжении V_0 достаточно хорошая. И для удобства на Рис. 3 приведены типовые осциллограммы процесса с разверткой 100 мкс/дел (одной малой клетке соответствует интервал времени 20 мкс), которые одинаково отражают случаи как наличия сигнала ФЭУ, так и отключенного ФЭУ. Стрелками указаны моменты времени, когда производилось фотографирование промежутка. Соответствующие этим моментам времени фотографии приведены на Рис.4 (есть подсветка, ФЭУ выключен).

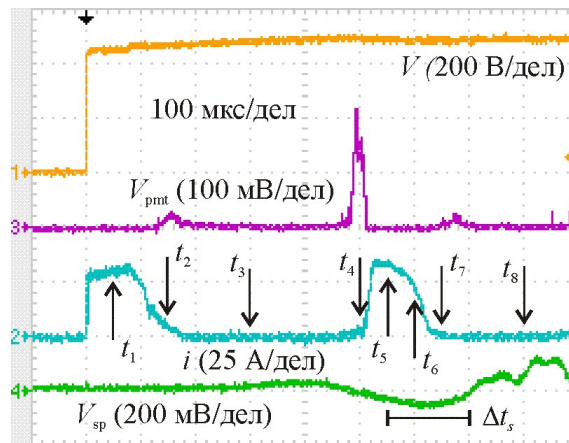


Рис. 3. Осциллограммы напряжения V , тока i , сигнала ФЭУ V_{pmt} и сигнала датчика давления V_{sp} . Стрелками отмечены характерные для процесса моменты времени: $t_1 = 50$ мкс, $t_2 = 150$ мкс, $t_3 = 300$ мкс, $t_4 = 500$ мкс, $t_5 = 550$ мкс, $t_6 = 600$ мкс, $t_7 = 650$ мкс, $t_8 = 800$ мкс.

В момент времени $t_1 = 50$ мкс на фотографии уже наблюдается область формирования микропузырьков вблизи центральной части активного электрода. К моменту времени $t_2 = 150$ мкс наблюдается уже хорошо различимый монопузырь практически порывающий всю поверхность активного электрода, что соответствует началу полной экранировки тока. Ток при этом резко уменьшается. Затем, пузырь увеличивается в размерах и покрывает собой часть

изолятора, окружающего торец электрода. Момент времени $t_3 = 300$ мкс соответствует наличию полной экранировки электрода, когда ток практически не протекает через жидкость. Далее пузырь начинает остывать и его размер уменьшается. Начиная с момента времени $t_4 = 500$ мкс, пузырь сжимается и уже не покрывает полностью активный электрод. Это соответствует резкому нарастанию тока.

В момент $t_5 = 550$ мкс ток достигает максимального значения, что означает практически полное исчезновение пузыря. Остаток пузыря под воздействием сил поверхностного натяжения стремится к сферической форме, и вследствие этого отрывается от торца электрода. Повторно начинается процесс нагрева и кипения жидкости проходящим через нее током вблизи торца электрода. К моменту $t_6 = 600$ мкс формируется новый монопузырь. Увеличиваясь в размерах, он двигает остаток первоначального пузыря в направлении обратного электрода. При этом пузыри разделены слоем жидкости не могут слиться в один пузырь. Начиная с момента времени $t_7 = 650$ мкс наблюдается полная экранировка электрода новым пузырем, который достигает максимального размера к моменту $t_8 = 800$ мкс, после чего начинает сдуваться и процесс повторяется. Датчик давления показывает заметное нарастание знакопеременного сигнала, соответствующего росту и сжатию пузыря спустя момент времени $t_5 = 550$, соответствующий максимуму тока с задержкой $\Delta t_s \approx 150$ мкс. Увеличивающаяся амплитуда звуковой волны обусловлена регистрацией биений в это время, что делает сигнал хорошо видимым.

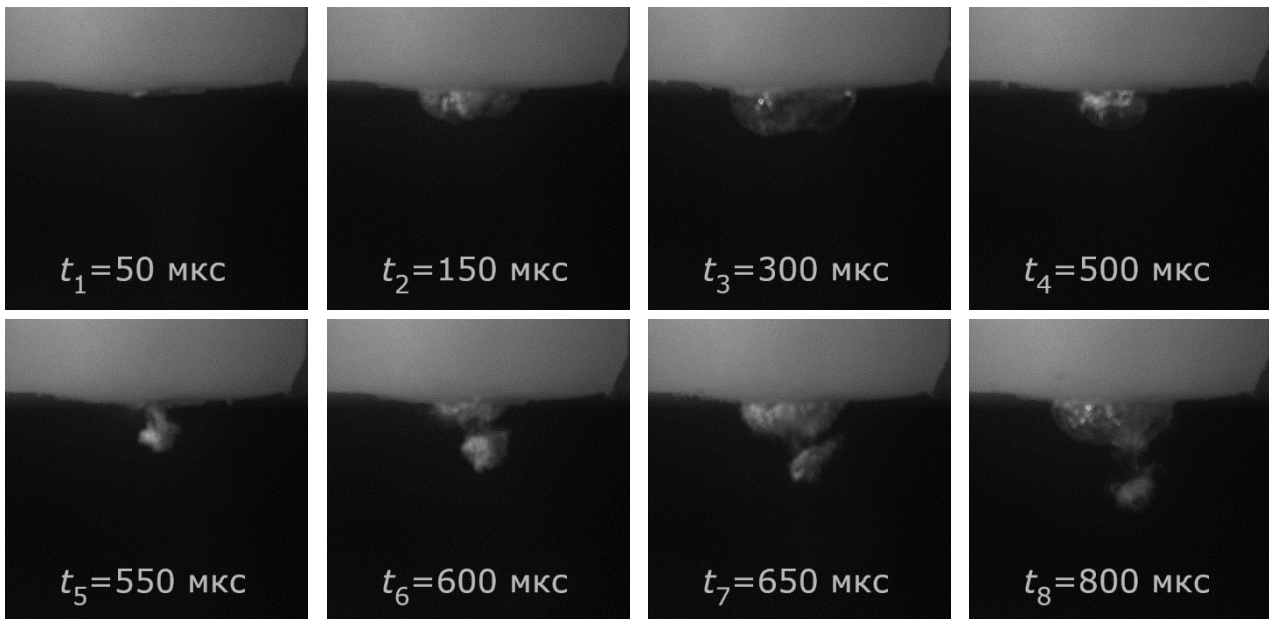


Рис. 4. Фотографии динамики образования пузыря на активном электроде, соответствующие моментам времени, отмеченным стрелкам на Рис. 3.

Также важно отметить появление сигнала ФЭУ в моменты времени $t_2 = 150$ мкс, $t_4 = 500$ мкс и $t_7 = 650$ мкс, соответствующие моментам спада и роста тока i . В эти моменты имеет место кратковременное образование тонкого кольцевого участка не покрытой жидкостью поверхности изолятора вокруг активного электрода внутри пузыря, обусловленное расширением и сжатием пузыря. При определенной ширине кольцевого участка вокруг активного электрода реализуются условия для зажигания разряда по поверхности изолятора между металлически анодом и жидким катодом, поскольку при полной экранировке активного электрода практически все напряжение прикладывается между электродом и поверхностью пузыря. Фотография такого разряда по поверхности изолятора приведена на Рис. 5б, где

CCD-камера была наклонена относительно плоскости торца активного электрода и смещена ниже.

Можно отметить, что в момент наличия свечения весь токоперенос внутри полностью покрытого паровым пузырем электрода обеспечивается только током разряда. И наоборот, когда нет полной экранировки, токоперенос обеспечивается исключительно ионами в электролите. В таких условиях можно указать величину тока разряда $i_d = 5\text{--}10$ А.

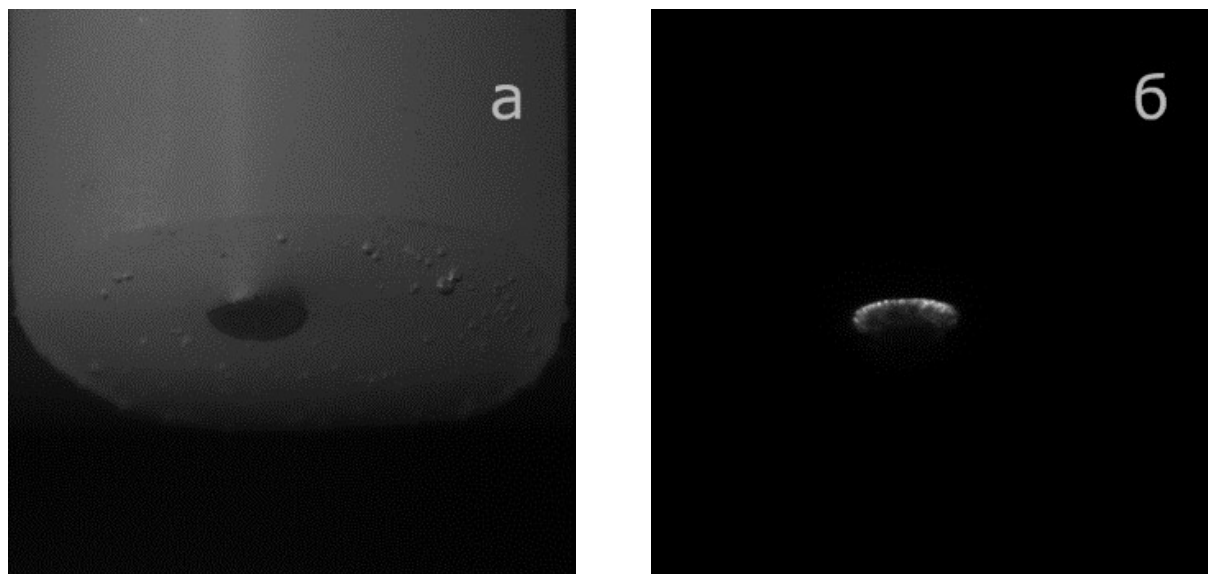


Рис. 5. Фотографии торца электрода для момента времени на Рис. 3 $t_4 = 500$ мкс: подсветка включена (а), свечение разряда без подсветки (б).

4. Заключение

Показано, что в описываемой геометрии электродов при напряжении около $V_0 = 500$ В реализуется автоколебательный режим протекания тока. Присутствует корреляция звукового давления с протекающим через электролит ток. Звуковое давление отражает расширение и сжатие наполненного паром пузыря, прилегающего к поверхности активного электрода. В моменты наступления и прекращения полной экранировки активного электрода зажигается искровой разряд вдоль не покрытой жидкостью поверхности изолятора.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FWRM-2021-0007.

5. Список литературы

- [1] P.J. Bruggeman, M.J. Kushner, B.R. Locke, et al, Plasma-liquid interactions: A review and roadmap, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **25**, 053002, 2016, doi: 10.1088/0963-0252/25/5/053002
- [2] P. Vanraes and A. Bogaerts, Plasma physics of liquids – A focused review, *Appl. Phys. Rev.*, vol. **5**, 031103, 2018, doi: 10.1063/1.5020511
- [3] Y. Cao, G. Qu, T. Li, N. Jiang, and T. Wang, Review on reactive species in water treatment using electrical discharge plasma: Formation, measurement, mechanisms and mass transfer *Plasma Sci. Technol.*, vol. **20**, 103001, 2018, doi: 10.1088/2058-6272/aacff4

- [4] Y.D. Korolev, I.A. Shemyakin, V.S. Kasyanov, V.G. Geyman, N.V. Landl, and A.V. Bolotov, Transient processes during an initial stage of breakdown in saline solution, *J. Appl. Phys.*, vol. **129**, 043304, 2021, doi: 10.1063/5.0035340
- [5] I.A. Shemyakin, V.S. Kasyanov, Y.D. Korolev, N.V. Landl, and A.V. Bolotov, Discharge development in a saline solution at the above-the-threshold voltages, *Russ. Phys. J.*, vol. **62**, 1982, 2020, doi: 10.1007/s11182-020-01932-9
- [6] Y.D. Korolev, I.A. Shemyakin, V.S. Kasyanov, V.G. Geyman, A.V. Bolotov, and V.O. Nekhoroshev, Development of discharge in a saline solution at near-threshold voltages, *Plasma Phys. Rep.*, vol. **44**, 581, 2018, doi: 10.1134/S1063780X18060053
- [7] Y.D. Korolev, N.V. Landl, A.V. Bolotov, V.S. Kasyanov, V.O. Nekhoroshev, and I.A. Shemyakin, Initial stages of pulsed discharge development in the saline solutions in a vicinity of threshold voltages, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **31**, 115013, 2022, doi: 10.1088/1361-6595/ac9c90