

УДК 537.52
EDN: QPMEAK

PACS: 52.80.Wq

**Влияние локальных неоднородностей проводимости
на форму разрядного канала в воде**

© В. А. Панов*, А. С. Савельев, Ю. М. Куликов

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия*** E-mail: panovvladislav@gmail.com**Статья поступила в редакцию 23.04.2025; после доработки 12.05.2025; принята к публикации 20.10.2025
Шифр научной специальности 1.3.9*

Экспериментально показан эффект формирования встречных разрядных каналов при инициации пробоя в слабопроводящей воде по следу с повышенной проводимостью от движущегося кристалла поваренной соли. Первый канал иницируется в промежутке между высоковольтным электродом и кристаллом соли, благодаря чему ток начинает протекать преимущественно по следу с повышенной проводимостью в результате растворения кристалла. Второй канал иницируется внутри следа на некотором расстоянии от кристалла и не имеет прямого контакта с заземленным электродом, который расположен на расстоянии 8 мм. Встречное движение разрядных каналов приводит к их объединению и окончательному формированию единого канала. На основе численного моделирования было дано объяснение данного эффекта, которое состоит в наличии вихревых структур в следе непосредственно за движущимся кристаллом, которые формируют более широкую, по сравнению с основной частью следа, область с более низкими концентрацией соли и проводимостью. В результате, плотность тока в данной области оказывается ниже, чем в основной части следа, что приводит к более позднему вскипанию жидкости и появлению плазменного канала.

Ключевые слова: направленный разряд; пробой; вода; электролит; поваренная соль; NaCl; кристалл; неоднородное поле проводимости.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-5-57-63

Введение

Направление электрического разряда может быть реализовано различными способами в зависимости от того, по какой среде ему предстоит распространяться: в газе это становится возможным как вследствие обычных тепловых эффектов (нагрев в области распространения излучения [1]), так и при оптическом пробое, приводящем к появлению длинной лазерной искры [2].

Одним из вариантов направления разряда является пробой вдоль поверхности раздела сред [3–5].

В случае подводных свободно распространяющихся разрядов межэлектродный

промежуток заполнен водой. Таким образом, предпробойные явления зависят от её проводимости [6] топологии электродов и параметров импульсов высокого напряжения, которые определяются схемой возбуждения импульсов. Начальная фаза свободного подводного разряда может включать образование газовой полости за счет джоулева нагрева и последующее развитие газового разряда в этой полости (теория газового пузыря [7]).

В жидкости направление разряда также возможно посредством лазерного излучения. В частности, в [8] исследовалась способность лазерных импульсов управлять водяными переключателями для мощных ускорителей. Авторы использовали три гармоники импульс-

ного Nd:YAG лазера (1064, 532 и 355 нм). Установлены пороговые значения плотности излучения – 110 Дж/см^2 (14 ГВт/см^2) для 532 нм.

Однако направление разряда в жидкости можно осуществить более простым и экономичным способом. В частности, в работе [9] для стабилизации процесса пробоя и создания более длинных искровых плазменных каналов между электродами авторы использовали тонкую металлическую проволоку. В таких случаях предпробойные процессы включают в себя быстрый импульсный нагрев и расплавление проволоки и последующий пробой канала, заполненного газом (паром) и каплями жидкого металла. Такие пробои, инициированные проволокой, обычно приводят к значительно более короткому времени инициирования и меньшим потерям энергии по сравнению со свободно распространяющимися разрядами в воде. Это направление широко исследовано в работе [10].

Экспериментальная часть работы [9] была сосредоточена на изучении импульсов давления, генерируемых разрядами со свободным распространением и проволочными разрядами в терминах энергии, доступной в разряде, её потерь до пробоя и энергии, подаваемой в искровой канал.

В [11] исследовалось влияние проводимости раствора на импульсный электрический разряд в жидкости методом оптической эмиссионной спектроскопии в реакторе с геометрией электродов «игла-плоскость». Интенсивность излучения радикалов гидроксила (OH⁻), радикала водорода (H⁺) и радикала кислорода (O⁻) измерялись с использованием метода калибровки интенсивности.

В [12] проведено параметрическое исследование импульсного плазменного разряда в воде в электродной конфигурации «игла-игла» (pin-to-pin). Рассматривалось влияние двух параметров: проводимости воды (от 50 до 500 мкСм/см) и приложенного напряжения (от 6 до 16 кВ). Для изучения распространения разряда и пробоя в воде были использованы две дополнительные диагностики на основе показателя преломления (с временным разрешением), а также электрические измерения. Для низкой проводимости (от 50 до 100 мкСм/см) результаты подтвердили существование двух режимов разряда (катодный и анодный), а увеличение приложенного напря-

жения сначала способствует появлению анодного режима. Для проводимости 500 мкСм/см для низкого приложенного напряжения в основном реализуется катодный режим, а также смешанный режим (анодный и катодный) для большого приложенного напряжения.

В работах [13, 14] рассматривалось явление разряда на поверхности воды и под водой, когда молния ударяет в поверхность жидкости. Лабораторные эксперименты проводились с использованием системы электродов точка-плоскость в среде, моделирующей морскую воду. Использовались водопроводная вода и солевые растворы с различной проводимостью, удар молнии имитировался импульсным разрядом на поверхности воды. Получены зависимости среднего значения тока, плотности электрического тока на аноде и катоде в зависимости от межэлектродного расстояния и электропроводности среды.

Анализ литературных источников показывает, что внимание исследователей сосредоточено на газожидкостных разрядах (разряд с жидким электродом), распространяющихся вдоль и перпендикулярно межфазной поверхности, а также на развитии разряда в средах с различной, но однородной по объему электропроводностью. Таким образом, в настоящее время отсутствуют результаты по исследованию разряда в жидкостях со стратификацией проводимости вследствие пространственной неоднородности равновесной концентрации носителей заряда (ионов примеси).

Ранее было показано [15], что направляющее действие на развитие разряда в слабопроводящей воде оказывает след от кристалла соли, движущего в воде, а напряжение подавалось в момент, когда кристалл оставлял высоковольтный электрод позади, а разряд распространялся по однородному следу в виде единого (без разрывов) плазменного канала.

Целью настоящей работы является экспериментальное и численное исследование эффекта формирования двух отдельных разрядных каналов, формирующихся на электроде и в следе, разделенных кристаллом.

Экспериментальная установка и методы

Экспериментальная часть работы состоит из двух этапов. Первый этап состоит в ре-

гистрации электрического разряда, направляемого по следу от движущегося кристалла соли. Второй этап состоит в определении проводимости жидкости внутри следа.

На первом этапе использовалась установка, подробно описанная ранее в [15], в которой метод неконтролируемого засева группы кристаллов в разрядный промежуток заменен методом введения одиночного кристалла в контролируемую точку разрядного промежутка. Это было сделано с помощью установки тонкой стеклянной трубки диаметром 3 мм и длиной около 10 см, зауженный конец которой (\varnothing 1 мм) касался поверхности воды в точке над острием высоковольтного электрода. При подаче кристалла в открытый торец трубки, вектор приобретаемой при падении скорости был близок к вертикальному, что повышало точность позиционирования и повторяемость эксперимента. Кристаллы соли предварительно калибровались по размерам на вибрационных ситах.

На втором этапе проводились измерения проводимости жидкости внутри следа. Для этого была проведена модификация установки, заключающаяся в изменении ее оптической и электрической частей. Метод измерения проводимости в следе заключается в измерении сопротивления между двумя электродами, разнесенными друг от друга на известное расстояние и контактирующими со следом длиной в это расстояние и диаметром, измеряемым оптическим методом.

Для измерения диаметра следа использовался оптический (теневого) метод визуализации, с помощью которого можно обнаруживать области жидкости, где концентрация соли ненулевая. Поскольку точность измерения диаметра следа оказывает наибольшее влияние на точность измерений, скоростная камера была снабжена микроскопом, что позволило увеличить пространственное разрешение более чем в 40 раз (до 2 мкм/пиксель). Остальные части оптической системы остались без изменений. Для контроля длины следа также использовалась оптическая система. Для этого скоростная видеокамера работала в режиме запуска по изображению. В нижней части области визуализации был виден частично заостренный электрод, а видеокамера была настроена таким образом, что когда кристалл соли приближался к его поверхности,

происходил ее запуск на запись. Этот же метод применялся для запуска на первом (разрядном) этапе экспериментов. Поскольку выходные сигналы камеры поступали на осциллограф, происходил его запуск в этот же момент, что обеспечивало контроль длины следа, по которому протекал ток. Для его создания прикладывалась разность потенциалов к обеим сторонам следа за счет подачи напряжения (5 В) к заостренному электроду и к проволоке диаметром 0,2 мм из никелевого сплава, которая размещалась внутри стеклянной трубки таким образом, что ее конец был заподлицо со срезом стеклянной трубки.

Осциллограммы показывают, что в момент касания кристалла электрода происходит заметный и относительно быстрый его рост, а сопротивление между электродами значительно уменьшается. Сопротивление следа между электродами рассчитывалось как отношение между приложенным напряжением и разностью величин тока, измеренных до момента касания электрода кристаллом соли и после этого момента. В связи со значительной разностью между проводимостью рассола в следе и в окружающей его воде, протеканием тока через боковые границы следа можно пренебречь. Далее проводимость в следе рассчитывалась в проводнике тока постоянного круглого сечения при известных его длине и диаметре. Это стало возможным из-за значительной разницы между характерным временем диффузии соли в воде и временем формирования следа (падения кристалла).

Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты. На рисунке 1 представлена кинограмма развития разряда вблизи острия анода. Движение кристалла происходит вдоль вектора \vec{g} поля тяжести со скоростью около 5 см/с. Автоматическая подача импульса напряжения происходит в момент, когда расстояние между электродом и кристаллом составляет около 50 мкм. В течение первых 15 мкс инициируется первый плазменный канал в промежутке между высоковольтным электродом и кристаллом соли, а также прогрев и парообразование в следе за кристаллом, выраженные в виде потемнения его центральной части и трех

отдельных очагов более интенсивного вскипания, отмеченных пунктиром, и связанных, вероятно, с отделением от кристалла макроскопических частиц. Общее сопротивление промежутка (рис. 2) между анодом и катодом в это время сначала снижается за счет появления первого плазменного канала, а затем кратковременно повышается около 20 мкс, что, вероятнее всего, связано с переходом жидкости в следе в газообразную фазу. Затем внутри нее происходит ионизация, в результате чего формируется второй плазменный канал, а сопротивление промежутка стремительно снижается. При этом между первым и вторым плазменными каналами остается существенный неионизированный промежуток около $\sim 0,5$ мм (кадр 31 мкс). В последующие 30 мкс происходит их встречное движение: первый канал огибает кристалл вдоль его поверхности, а второй продвигается по проводящему следу навстречу первому. Смыкание каналов происходит в момент 55 мкс. После этого сопротивление промежутка, напряжение и ток выходят на стационарные значения.

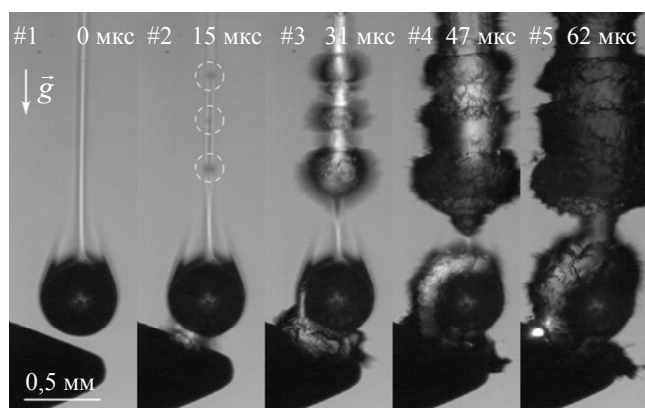


Рис. 1. Фотографии разрядного промежутка при развитии электрического разряда в воде, направляемого следом от тонущего кристалла поваренной соли. Время экспозиции 10 мкс, 64000 кадр/с

Формирование двух встречных каналов может быть обусловлено особенностями распределения концентрации соли (и проводимости) в области позади кристалла. На это косвенно указывают видимые контуры следа вблизи поверхности кристалла – помимо цилиндрической вертикальной части следа, которая начинается на верхнем полюсе кристалла и продолжается вверх за границы видимой области, видны также боковые следы, которые

начинаются ближе к экватору и направлены в сторону цилиндрической части под некоторым углом.

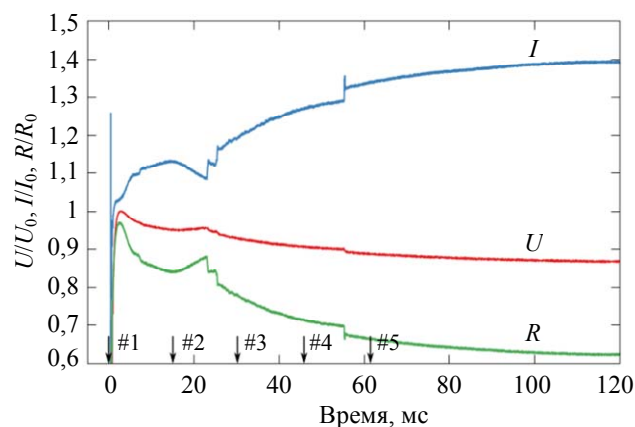


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (U), тока (I) и сопротивления (R) на разрядном промежутке, соответствующие кинограмме на рис. 1. Сверху указаны номера кадров

Математическое моделирование. Для проверки данного предположения было проведено двумерное (плоское) численное моделирование, состоящее из двух частей: 1) моделирование режима обтекания кристалла с диффузией поваренной соли с поверхности кристалла для получения распределения концентрации соли в следе; 2) моделирование протекания тока в воде с учетом неоднородности проводимости.

Результаты моделирования течения представлены на рисунке 3 для поля скорости (слева) и проводимости (справа). Режим обтекания кристалла является ламинарным, с формированием пары вихрей со стороны следа. Их форма и положение определяют распределение проводимости среды (и концентрации соли). Его структура совпадает с наблюдаемой экспериментально: наличие центральной части и боковых огибающих с началом около экватора кристалла и окончанием на центральной части следа на расстоянии около 0,5 мм от поверхности кристалла. Более вытянутая форма широкой части следа в моделировании может быть связано с влиянием силы тяжести, которая не учитывается в настоящем расчете, но может сокращать длину широкой части следа и с ограниченной чувствительностью теневого метода к градиентам плотности.

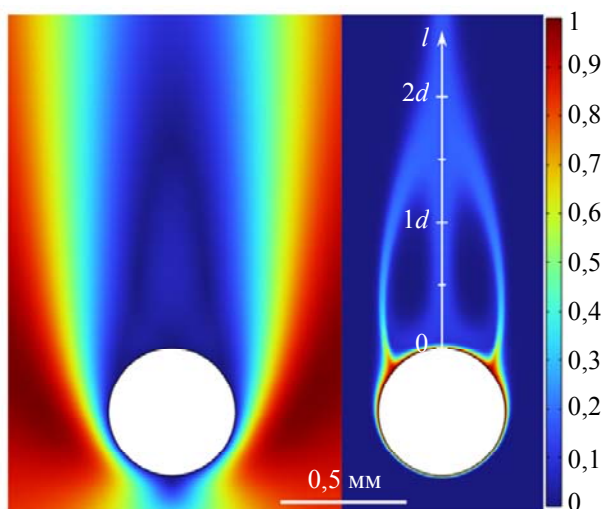


Рис. 3. Результаты моделирования обтекания кристалла для скорости (слева, м/с) и проводимости (справа, мСм/см) среды

Результаты моделирования протекания электрического тока представлены на рисунке 4.

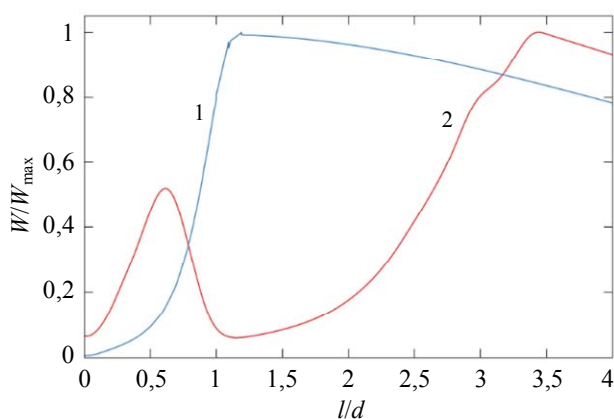


Рис. 4. Результаты моделирования распределения тепловыделения $W [Вт/м^3]/W_{max}[Вт/м^3]$ на оси следа. Расстояние l отсчитывается от поверхности кристалла (см. рисунок 3, справа). Кривая 1 – вариант расчета с постоянной проводимостью в следе; кривая 2 – с переменной проводимостью с учетом наличия вихрей

Распределение объемного тепловыделения ($Вт/см^3$) дано на оси следа с началом на поверхности кристалла в нормированном виде для двух случаев: 1) среда разделена на две области – окружающая жидкость с проводимостью 50 мкСм/см, контур следа, повторяющий экспериментальный, с постоянной внутри него проводимостью, рассчитанной из эксперимента и равной 50 мСм/см; 2) отличается от первого контуром следа и распределением проводимости, взятыми из расчета. Несмотря

на упрощения, принятые в первом случае, график тепловыделения (кривая 1) хорошо согласуется с наблюдаемой картиной вскипания – выход на максимальное значение происходит на расстоянии 0,5 мм, где экспериментально фиксируется потемнение следа и последующее вскипание. Во втором случае (кривая 2) формирование вихрей с пониженной внутри них проводимостью приводит к протеканию тока преимущественной в приосевой зоне, что объясняет появление локального максимума вблизи координаты $x = 0,3$ мм. На амплитуду этого максимума значительно влияет время расчета, т. к. диффузия ионов NaCl имеет низкое значение. Для приведенного графика выбран момент времени, близкий ко времени движения кристалла от поверхности воды до поверхности высоковольтного электрода. По мере удаления от кристалла оба графика демонстрируют спад тепловыделения, что связано со снижением напряженности поля в результате отдаления от обоих электродов (высоковольтного и заземленного), что согласуется с ограниченным распространением разрядного канала в следе, зафиксированным ранее [15].

Выводы

Развитие электрического разряда в воде, направляемого проводящим следом от движущегося кристалла соли NaCl имеет ряд особенностей, связанных с распределением концентрации растворенной соли в следе, которые в конечном итоге влияют на структуру формирующегося разрядного канала. Ламинарное обтекание кристалла приводит к формированию вихрей, примыкающих к кристаллу со стороны следа, которые способствуют расширению следа в этой части и неоднородному распределению растворившейся соли. Экспериментальные результаты и моделирование указывают на неравномерность тепловыделения в следе, что приводит к инициации двух отдельных разрядных каналов, разделенных объемом неионизованной жидкости. При этом первый канал начинается на поверхности электрода и заканчивается на поверхности кристалла, а второй – начинается и заканчивается в следе, то есть имеет только опосредованный контакт с электродами через

окружающую жидкость с низкой проводимостью и участок следа вблизи кристалла (и не имеет прямого контакта «плазма–металл»).

Данная особенность не наблюдалась ранее, когда к моменту подачи напряжения высоковольтный электрод оставался позади кристалла, а инициации разряда происходила в однородной цилиндрической части следа. Наличие кристалла и широкой части следа, примыкающей к нему, на пути разрядного канала вносит задержку в формирование единого плазменного канала на уровне десятков микросекунд (в условиях настоящего эксперимента), что следует учитывать в случае практического использования такого способа направленной инициации пробоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Apollonov V. V., Vasilyak L. M., Kazantsev S. Y., Kononov I. G., Polyakov D. N., Saifulin A. V., Firsov K. N. / *Quantum Electronics*. 2002. Vol. 32. № 2. P. 115–120.
2. Василяк Л. М., Унковский С. Ю. / *Теплофизика высоких температур*. 1990. Т. 28. № 3. С. 590–593.
3. Vaulin D. N., Yershov A. P., Kamenshikov S. A., Chernikov V. A. / *High Temperature*. 2011. Vol. 49. № 3. P. 356–362.
4. Shmelev V. M., Margolin A. D. / *High Temperature*. 2003. Vol. 41. № 6. P. 735–741.
5. Stephan K. D., Sheleg G. / *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2015. Vol. 43. № 2. P. 501–505.
6. Hogg M., Timoshkin I., Given M., Wilson M., Macgregor S., Wang T., Fouracre R., Lehr J. / *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2012. Vol. 19. № 5. P. 1559–1568.
7. Li X., Xiao T., Lan M., He H., Li R., Xiong D., Li J. / *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2022. Vol. 29. № 6. P. 2236–2242.
8. Woodworth J. R., Zamoski N. D., Johnson D. L., Sarkisov G. S., Blickem J. R., Valde D. M. V. D., Starbird R. L., Wilkins F. L. *Laser Triggering of Water Switches in Terawatt-Class Pulse Power Accelerators* – Sandia National Laboratories, 2005.
9. Chai Y., Timoshkin I. V., Wilson M. P., Given M. J., MacGregor S. J. / *Energies*. 2023. Vol. 16. № 13. P. 4932.
10. Юткин Л. А. *Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности*. – Л.: Машиностроение, 1986.
11. Shih K.-Y., Locke B. R. / *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2011. Vol. 39. № 3. P. 883–892.
12. Rond C., Desse J. M., Fagnon N., Aubert X., Vega A., Duten X. / *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018. Vol. 52. № 2. P. 025202.
13. Midi N. S., Ohyama R.-I. / *2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. – West Lafayette, IN, USA, 2010. P. 1–4.
14. Midi N. S., Ohyama R.-I. / *2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. – Cancun, Mexico, 2011. P. 223–226.
15. Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М. / *Прикладная физика*. 2025. № 6 (в печати).

PACS: 52.80.Wq

The influence of local conductivity inhomogeneities on the shape of a discharge channel in water

V. A. Panov*, A. S. Saveliev and Yu. M. Kulikov

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow 125412 Russia

*E-mail: panovvladislav@gmail.com

Received 23.04.2025; revised 12.05.2025; accepted 20.10.2025

The paper experimentally demonstrates the effect of formation of counter discharge channels during breakdown initiation in weakly conducting water along a trace with increased conductivity from a moving crystal of table salt. The first channel is initiated in the gap between the high-voltage electrode and the salt crystal, due to which the current begins to flow mainly along the trace with increased conductivity as a result of the crystal dissolution. The second channel is initiated inside the trace at some distance from the crystal and has no direct contact with the grounded electrode, which is located at a distance of 8 mm. The counter motion of the discharge channels leads to their unification and final formation of a single channel. This effect is explained based on numerical modeling, which consists in the presence of vortex struc-

tures in the trace directly behind the moving crystal, which form a wider, compared to the main part of the trace, region with lower salt concentration and conductivity. As a result, the current density in this region is lower than in the main part of the trace, which leads to later boiling of the liquid and the appearance of a plasma channel.

Keywords: guided discharge; breakdown; water; electrolyte; salt; NaCl; crystal; non-uniform conductivity field.

REFERENCES

1. Apollonov V. V., Vasilyak L. M., Kazantsev S. Y., Kononov I. G., Polyakov D. N., Saifulin A. V. and Firsov K. N., *Quantum Electronics* **32** (2), 115–120 (2002).
2. Vasilyak L. M. and Unkovski S. Yu., *Teplofizika vysokikh temperature* **28** (3), 590–593 (1990) [in Russian].
3. Vaulin D. N., Yershov A. P., Kamenschikov S. A. and Chernikov V. A., *High Temperature* **49** (3), 356–362 (2011).
4. Shmelev V. M. and Margolin A. D., *High Temperature* **41** (6), 735–741 (2003).
5. Stephan K. D. and Sheleg G., *IEEE Transactions on Plasma Science* **43** (2), 501–505 (2015).
6. Hogg M., Timoshkin I., Given M., Wilson M., Macgregor S., Wang T., Fouracre R. and Lehr J., *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* **19** (5), 1559–1568 (2012).
7. Li X., Xiao T., Lan M., He H., Li R., Xiong D. and Li J., *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* **29** (6), 2236–2242 (2022).
8. Woodworth J. R., Zamoski N. D., Johnson D. L., Sarkisov G. S., Blickem J. R., Valde D. M. V. D., Starbird R. L. and Wilkins F. L. Sandia National Laboratories, 2005.
9. Chai Y., Timoshkin I. V., Wilson M. P., Given M. J. and MacGregor S. J., *Energies* **16** (13), 4932 (2023).
10. Yutkin L. A. *Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti*. L., Mashinostroeniye, 1986 [in Russian].
11. Shih K.-Y. and Locke B. R., *IEEE Transactions on Plasma Science* **39** (3), 883–892 (2011).
12. Rond C., Dese J. M., Fagnon N., Aubert X., Vega A. and Duten X., *Journal of Physics D: Applied Physics* **52** (2), 025202 (2018).
13. Midi N. S. and Ohyama R.-I. Proc. 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. West Lafayette, IN, USA, 2010. P. 1–4.
14. Midi N. S. and Ohyama R.-I. Proc. 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico, 2011. P. 223–226.
15. Panov V. A., Saveliev A. S. and Kulikov Yu. M., *Applied Physics*, № 6 (in print) (2025) [in Russian].

Об авторах

Панов Владислав Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: panovvladislav@gmail.com SPIN-код: 5821-2776, AuthorID: 755538

Савельев Андрей Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: fisteh@mail.ru SPIN-код: 6888-7369, AuthorID: 866343

Куликов Юрий Матвеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: kulikov-yurii@yandex.ru SPIN-код: 7719-8459, AuthorID: 1130937