

УДК 537.52  
EDN: QXQWSV

PACS: 52.80.Wq

## Направленный электрический разряд в воде по каналу с ионами соли NaCl

© 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 23.05.2025; после доработки 30.06.2025; принята к публикации 11.12.2025  
Шифр научной специальности: 1.3.9*

*Продemonстрирована возможность направления распространения канала электрического разряда в воде с помощью создания локальных зон повышенной проводимости, которые возникают в следе от движущегося в воде кристалла поваренной соли. Направленный разряд был получен в воде с электропроводностью 350 мкСм/см под действием импульсного напряжения миллисекундной длительности амплитудой 7 кВ в межэлектродном промежутке 8 мм. Эффект заключается в изменении разрядным каналом своего направления распространения при встрече со следом тонущего кристалла, т. е. нормальное горизонтальное (относительно направления силы тяжести) распространение от анода к катоду сменяется направленным вертикальным распространением по следу с повышенной из-за постепенного растворения кристалла проводимостью.*

*Ключевые слова:* направленный разряд, пробой, вода, электролит, поваренная соль, NaCl, кристалл.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-38-43

### Введение

Направленный электрический разряд возникает в тех случаях, когда среда, по которой он распространяется, обладает пространственной неоднородностью электрической прочности, связанной с локальным присутствием дополнительных носителей заряда. Подобные неоднородности могут существовать в среде стационарно, либо создаются на некоторое время непосредственно перед распространением канала электрического разряда.

Примером такой стационарной неоднородности электропроводности может служить стратификация состава почвы в вертикальном направлении, которая определяет режим и эффективность работы систем заземления [1], амплитуды электрического и магнитного полей, создаваемых разрядом молнии [2], а так-

же переходные характеристики по напряжению [3] и току [4].

В газах возможно либо квазистационарное, либо кратковременное создание неоднородностей (плотности, проводимости) из-за сильной, по сравнению с твердыми веществами, диффузии. Примером таких неоднородностей могут выступать ударные волны и волны разрежения, изменение плотности в которых выступает в роли своеобразного «газодинамического диода» для стримеров [5]. Для некоторых типов разряда удается получить постоянное во времени пространственное распределение плотности с помощью полей звукового давления [6], приводящее к возможности стационарного управления положением и формой разрядного канала. Однако авторы работы [6] отмечают, что для других типов разряда повлиять на ход канала не уда-

ется из-за превалирования действия, вызванного перепадом температуры (плотности), над звуковым давлением. Примером кратковременного воздействия является лазерный импульсный прогрев газа в межэлектродном промежутке на пути распространения луча, по которому затем распространяется электрический разряд [7]. Направляющее действие в данном случае связано с понижением плотности и увеличением длины свободного пробега в газе после прогрева лазером. Если же плотность энергии превышает определенное значение, то возможен оптический пробой в виде отдельных очагов возникновения плазмы вдоль пути излучения [8]. На основе этих явлений разрабатываются активные системы молниезащиты [9].

Направленный электрический разряд в воде играет важную роль в электрогидравлической технологии обработки различных материалов посредством импульсного воздействия высоким давлением и электрохимическими эффектами [10]. Его суть состоит в преобразовании электрической энергии в механическую посредством быстрого энерговыделения в тонком разрядном канале с последующим движением жидкости и формированием ударных волн. Эффективность такого преобразования зависит от многих параметров — амплитуда импульса тока, расстояние между электродами, длительность и крутизна фронтов импульса, величина ударной емкости и др., однако на первом месте по значимости стоит необходимость получения длинных (и сверхдлинных) разрядных каналов, что представляет определенную трудность из-за наличия у воды ионной проводимости. Для решения этой задачи автором [10] был предложен метод электрического (теплого) взрыва проводника, обычно проволоки, который предварительно соединялся с электродами и задавал направление будущему разрядному каналу при пропускании через него тока большой плотности. Этим же автором был предложен альтернативный способ направленного радиационного (в том числе лазерного) воздействия, при котором ток распространяется по каналу с более низкой плотностью, возникшему при распространении в жидкости излучения.

В качестве нового способа создания в воде области предпочтительного развития разрядного канала в виде локальной зоны повышенной проводимости рассматривается движение кристалла соли в межэлектродном промежутке. Суть способа состоит в постепенном растворении кристалла по мере его движения и в формировании позади него следа с локальной повышенной концентрацией ионов соли (т. е. с повышенной электропроводностью). Такой подход, с одной стороны, не требует механической переустановки проволоки, как в случае с её электрическим взрывом, а с другой — не требует применения дополнительного оборудования, как в случае с пробоем, направляемым лазерным излучением. Использование соли также исключает возможность загрязнения электродов, которое происходит в случае приваривания частей взрываемого металлического проводника. Дополнительным преимуществом также является относительно большое время жизни следа по сравнению с длительностью разряда, что упрощает синхронизацию процессов введения кристалла в разрядный промежуток и подачи импульса напряжения.

Целью настоящей работы является получение направленного разряда в проводящей воде при воздействии импульсного напряжения миллисекундной длительности с использованием кристаллов поваренной соли.

### Экспериментальная установка и методы

В работе использована установка, описанная в [11] и модифицированная сообразно цели работы. В прозрачную емкость из оргстекла (1 на рис. 1) наливалась дистиллированная вода, ниже ее уровня размещались электроды — высоковольтный заостренный электрод (2) и цилиндрический электрод (3) из вольфрамового стержня, расположенные на расстоянии 8 мм друг от друга. Боковая поверхность электродов изолирована от воды за исключением рабочих торцов. Уровень воды в емкости такой, что он полностью покрывает электроды, но при этом расстояние от поверхности воды до поверхности высоковольтного электрода составляет величину около 1 см. Относительно небольшая величина этого рас-

стояния позволяет кристаллам поваренной соли достигать межэлектродного промежутка с постоянной скоростью, поскольку диаметр в ходе растворения практически не меняется. Это обеспечивает, как видно по результатам визуализации, формирование следа практически постоянного диаметра. Падая в воде, кристалл оставляет тонкий след в виде протяженной области повышенной проводимости за счет частичного растворения соли, показанной на рисунке 1 пунктирной линией вблизи электрода 2.

Для визуализации процесса образования следа повышенной проводимости используется оптическая схема, основанная на теневом методе визуализации, чувствительная к локальным изменениям плотности жидкости за счет частичного растворения кристалла. Люминесцентный светодиод 4 и собирающая линза 5 создают параллельный пучок света, освещающий область вблизи высоковольтного электрода. Скоростная цифровая видеокамера 6, снабженная длиннофокусным объективом 7, непрерывно регистрирует теневую картину вблизи острия электрода 2 с пространственным разрешением 95 мкм/пиксель. Видеокамера выполняет запись процесса в память и при её запуске отправляет синхроимпульс на запускающие входы генератора импульсов 8 («TRIG») и осциллографа («Ext/10»). После этого генератор 8 формирует запускающий импульс для высоковольтного ключа 10 длительностью порядка 1 мс. Ключ 10 без задержки (фронт нарастания  $\sim 0,1$  мкс) коммутирует высокое напряжение с батареи С, заряжаемой через балластный резистор  $R_b$  (1 МОм) высоковольтным источником 11 до напряжения 7 кВ, через ограничивающий резистор  $R_1$  (5 кОм) на высоковольтный электрод.

Для сопоставления номера кадра кинограммы с моментом подачи высокого напряжения на канал 1 осциллографа 9 подается сигнал F\_SYNC видеокамеры, соответствующий моментам начала экспозиции каждого кадра, а на канал 2 – сигнал генератора 8. Кроме того, на канал 3 осциллографа подается сигнал высоковольтного делителя 12 1:1000, подключенного к высоковольтному электроду 2, а на канал 4 – напряжение с токового шунта  $R_s$  для измерения тока цепи.

## Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены фотографии разрядного промежутка в различные моменты времени после подачи напряжения с емкости С, заряженной до 12 кВ. Напряжение зарядки выбрано таким образом, чтобы при разряде в отсутствие солевых следов не наступало замыкание промежутка плазменным каналом. Состояние промежутка в момент подачи напряжения дано на кадре #0. Вблизи острия анода видны траектории группы движущихся кристаллов в виде светлых нитей с темными краями, а также два кристалла ближе к катоду в виде темных точек с диаметром около 0,4 мм, которые практически не меняют своего положения в пространстве за время действия импульса 1 мс. Развитие разряда начинается на острие анода, где в течение первых 80 мкс происходит прогрев воды и появляется парогазовая область, вытягивающаяся в сторону катода (90 мкс, #2). Как только она достигает ближайшего следа, плазма разрядного канала начинает светиться сильнее, а ее форма становится Т-образной. Начиная с этого момента, канал меняет направление своего развития и движется вертикально по траектории кристалла одновременно вверх и вниз. Симметричность продвижения канала говорит о близких параметрах среды, в том числе электропроводности в следе, как по направлению движения кристалла, так и против. Скорость роста канала, рассчитанная между кадрами #3 и #4, составила не менее 7 м/с, что характерно для теплового механизма пробоя в проводящей воде [12]. Дальнейшее развитие парогазовой области, в которой находится канал (#5–#7), происходит за счет увеличения ее диаметра при незначительном ее удлинении. Ее структура сохраняет свою симметрию относительно горизонтальной плоскости, проходящей через ось электродов. При этом прослеживается развитие начальной парогазовой области, форма которой близка к сферической. Характерной особенностью структуры является коническая форма вершин канала с углом около  $60^\circ$ . На более поздних стадиях развития пробоя происходит инициация второй плазменной области – с катода, которая связана только с тепловыми процессами вблизи поверхности без дополнительного участия

кристаллов соли. К моменту окончания действия импульса напряжения парогазовая область и канал разряда у анода теряют свою первоначальную структуру и существуют в форме единой области.

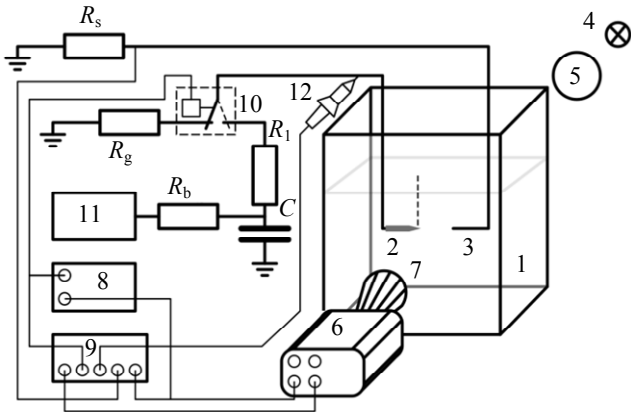


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

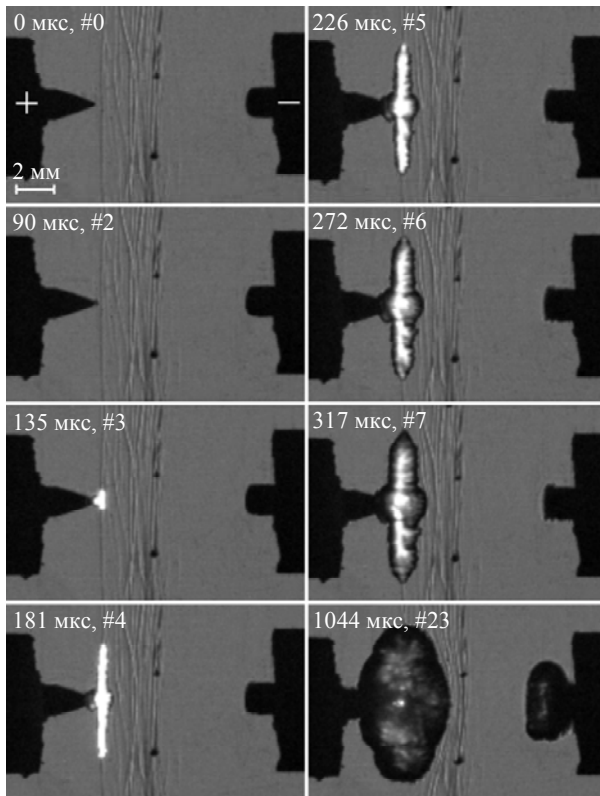


Рис. 2. Фотографии разрядного промежутка при развитии электрического разряда в воде, направленного следом от тонущего кристалла поваренной соли. Время экспозиции 0,9 мкс

Осциллограммы напряжения, тока, сопротивления и выделяемой мощности имеют характерные участки, отражающие наблюдаемые на фотографиях явления. На участке от 0 мкс до точки А (рис. 3), 80 мкс, происходит прогрев воды вблизи острия анода и образо-

вание парогазовой области. В точке А начинается плазмообразование внутри образовавшейся парогазовой области. Оно сопровождается ростом тока за счет увеличения проводимости в данной области и общей площади контакта с окружающей жидкостью. Основной рост тока и снижение общего сопротивления промежутка происходит на стадии распространения канала по траектории кристалла: дополнительный спад сопротивления на 20 % от начального значения происходит между 90 и 135 мкс. После зажигания разряда в точке А, мощность, необходимая для его поддержания, снижается, а общее сопротивление промежутка продолжает снижаться. Однако эта тенденция сменяется обратным ростом сопротивления по мере приближения к точке Б (840 мкс). Наиболее вероятно, это связано с ростом парогазового пузыря у катода, который, до момента возникновения плазмы, уменьшает эффективную площадь контакта катода с водой и затрудняет протекание тока. После возникновения пробоя внутри этого пузыря сопротивление промежутка резко падает за несколько микросекунд и продолжает снижаться вплоть до конца действия напряжения. За время действия импульса рост выделившейся энергии был практически линейным. Суммарная энергия составила около 5 Дж.

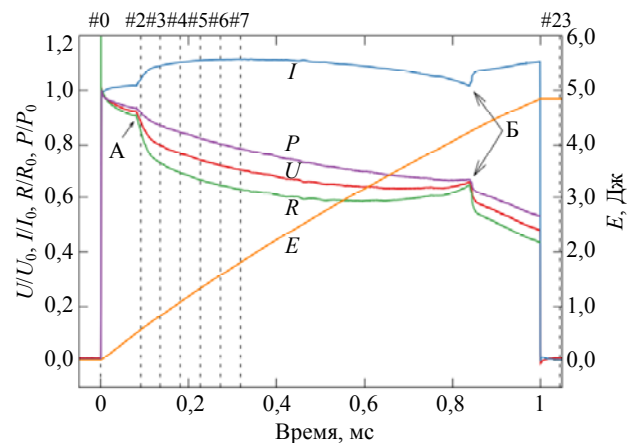


Рис. 3. Осциллограммы нормированных на начальные значения ( $t=0$ ) напряжения ( $U$ ), тока ( $I$ ), сопротивления ( $R$ ), мощности ( $P$ ) и абсолютного значения выделившейся энергии ( $E$ ) на разрядном промежутке при распространении направленного разряда в воде.  $[U_0, I_0, R_0, P_0] = [5,1 \text{ кВ}, 1,3 \text{ А}, 3,9 \text{ кОм}, 6,6 \text{ кВт}]$ . Пунктирными линиями обозначены моменты экспозиции кадров с соответствующими номерами, указанными над линиями. Точка А (80 мкс) – начало плазмообразования у острия анода, Б (840 мкс) – начало плазмообразования у катода

## Выводы

Впервые продемонстрирована возможность управления направлением распространения канала электрического разряда в воде с помощью создания локальных зон повышенной проводимости, которые возникают в следе от движущегося в воде кристалла поваренной соли. Направленный разряд был получен в воде с электропроводностью 350 мкСм/см под действием импульсного напряжения миллисекундной длительности амплитудой 7 кВ в межэлектродном промежутке длиной 8 мм. Эффект выражается в том, что разрядный канал изменяет направление своего распространения при встрече со следом тонущего кристалла, т. е. нормальное горизонтальное распространение от анода к катоду сменяется направленным вертикальным распространением по траектории с повышенной проводимостью в результате постепенного растворения кристалла. Развитие разряда при этом происходит по тепловому механизму, свойственному проводящей воде при относительно невысоких напряжениях и высоких длительностях импульса. Анализ осциллограмм тока и напряжения говорит о значительном уменьшении сопротивления между электродами в момент времени, когда канал разряда начинает прорасти в следе. Мощность, выделяемая в разрядном промежутке, падение напряжения на нем также уменьшаются в этот момент, а ток разряда наоборот – увеличивается. При этом зависимость величины энергии, выделяемой в воде, от времени имеет линейный характер роста.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasilyak L. M., Pecherkin V. Y., Vetchinin S. P., Panov V. A., Son E. E., Efimov B. V., Danilin A. N., Kolobov V. V., Selivanov V. N., Ivonin V. V. / Journal of Physics D: Applied Physics. 2015. Vol. 48. № 28. P. 285201.
2. Delfino F., Procopio R., Rossi M., Shoory A., Rachidi F. / 2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Fort Lauderdale, FL, USA, 2010. P. 45–50.
3. Anderson R. J. de Araújo, L. M. de Azevedo W., Pissolato Filho J., S. L. Colqui J., Kurokawa S. / Anais do Congresso Brasileiro de Automática. – Brasil, 2020. 10.48011/asba.v2i1.1182
4. de Azevedo W. L. M., da Silva W. C., D'Annibale J. L. A., de Araújo A. R. J., Colqui J. S. L., Filho J. P. / Proceedings do XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente / X Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. – Brasil, 2023. 10.20906/sbai-sbse-2023/3980
5. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L. / Plasma Sources Science and Technology. 2019. Vol. 28. № 9. P. 095022.
6. Irisarri J., Ezcurdia I., Iriarte N., Sirkka M., Nikolaev D., Mäkinen J., Martinez-Marchese A., Iablonskiy D., Salmi A., Marzo A. / Science Advances. 2025. Vol. 11. № 6.
7. Aihara Y., Shindo T., Miki M., Suzuki T. / Electrical Engineering in Japan. 1993. Vol. 113. № 4. P. 66–77.
8. Vasilyak L., Kostyuchenko S., Kudryavtsev N., Filyugin I. / Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 1994. Vol. 164. № 3. P. 263.
9. Ball L. M. / Applied Optics. 1974. Vol. 13. № 10. P. 2292.
10. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986.
11. Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Савельев А. С., Куликов Ю. М., Филаткин А. А. / Прикладная физика. 2022. № 6. С. 29–34.
12. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Y., Son E. E. / Journal of Physics D: Applied Physics. 2016. Vol. 49. № 38. P. 385202.

PACS: 52.80.Wq

## Guided discharge in water with the aid of NaCl crystals

V. A. Panov<sup>\*</sup>, A. S. Saveliev and Yu. M. Kulikov

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

<sup>\*</sup>E-mail: panovvladislav@gmail.com

Received 23.05.2025; revised 30.06.2025; accepted 11.12.2025

***For the first time, the possibility of controlling the direction of propagation of an electric discharge channel in water by creating local zones of increased conductivity that arise in the "trace" of a table salt crystal moving in water has been demonstrated. A directed discharge***

*was obtained in water with an electrical conductivity of 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$  under the action of a millisecond-duration pulse voltage with an amplitude of 7 kV in an 8 mm interelectrode gap. The effect consists in the discharge channel changing its direction of propagation when it encounters the "trace" of a sinking crystal, i.e. normal horizontal (relative to the direction of gravity) propagation from the anode to the cathode is replaced by directed vertical propagation along the "trace" with increased conductivity due to the gradual dissolution of the crystal.*

*Keywords:* guided discharge; breakdown; water; electrolyte; salt; NaCl; crystal.

## REFERENCES

1. Vasilyak L. M., Pecherkin V. Y., Vetchinin S. P., Panov V. A., Son E. E., Efimov B. V., Danilin A. N., Kolobov V. V., Selivanov V. N. and Ivonin V. V., *Journal of Physics D: Applied Physics* **48** (28), 285201 (2015).
2. Delfino F., Procopio R., Rossi M., Shoory A. and Rachidi F. *Proc. 2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Fort Lauderdale, FL, USA, 2010, pp. 45–50.
3. Anderson R. J. de Araújo, L. M. de Azevedo W., Pissolato Filho J., S. L. Colqui J. and Kurokawa S. *Proc. Anais do Congresso Brasileiro de Automática*. Brasil, 2020. 10.48011/asba.v2i1.1182.
4. de Azevedo W. L. M., da Silva W. C., D'Annibale J. L. A., de Araújo A. R. J., Colqui J. S. L. and Filho J. P., *Proceedings do XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente / X Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. Brasil, 2023. 10.20906/sbai-sbse-2023/3980.
5. Starikovskiy A. Y. and Aleksandrov N. L., *Plasma Sources Science and Technology* **28** (9), 095022 (2019).
6. Irisarri J., Ezcurdia I., Iriarte N., Sirkka M., Nikolaev D., Mäkinen J., Martinez-Marchese A., Iablonskiy D., Salmi A. and Marzo A., *Science Advances* **11** (6), (2025).
7. Aihara Y., Shindo T., Miki M. and Suzuki T., *Electrical Engineering in Japan* **113** (4), 66–77 (1993).
8. Vasilyak L., Kostyuchenko S., Kudryavtsev N. and Filyugin I., *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **164** (3), 263 (1994).
9. Ball L. M., *Applied Optics* **13** (10), 2292 (1974).
10. Yutkin L. A. *Elektrohidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti*. L.: Mashinostroeniye, 1986 [in Russian].
11. Panov V. A., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Kulikov Yu. M., Saveliev A. S. and Filatkin A. A., *Applied Physics*, № 6, 29–34 (2022) [in Russian].
12. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Y. and Son E. E., *Journal of Physics D: Applied Physics* **49** (38), 385202 (2016).

## 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