

Экспериментальное исследование высоковольтного пробоя разрядного промежутка при электровзрыве в воде

И. Н. Старков*, А. Д. Блащенко

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина,
e-mail: igorstark21@gmail.com

Поступила в редакцию 26.04.2026

После доработки 19.05.2026

Принята к публикации 01.06.2026

Приведены результаты экспериментальных исследований высоковольтного электрического разряда (ВЭР) в воде при высоковольтном пробое межэлектродного промежутка, что является наиболее распространенным режимом в разрядно-импульсных технологиях. Основное внимание уделено анализу предпробивной стадии разряда, на которой создаются условия для пробоя и формирования плазменного канала, а также изучению эффективности разрядного процесса. Для регистрации процессов использовались осциллографы с различными масштабами, что позволило детально фиксировать временные зависимости тока, напряжения, электрического сопротивления, мощности и энергии, рассеиваемой в среде и выделяемой на нагрузке. Анализ осциллограмм показал, что на предпробивной стадии ток затухает медленнее, чем напряжение, а рассеиваемая энергия постепенно увеличивается. В момент пробоя наблюдаются резкие снижение напряжения и возрастание тока, сопровождающиеся уменьшением сопротивления разрядного промежутка до величины, характерной для плазменного канала. Полученные временные зависимости электрического сопротивления, мощности и энергии позволяют оценить динамику преобразования энергии в процессе формирования разряда.

Ключевые слова: высоковольтный разряд, предпробивная стадия, плазменный канал, разрядно-импульсные технологии, энергия разряда

УДК 537.528.2

<https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.3.39>

ВВЕДЕНИЕ

Разрядно-импульсные технологии (РИТ), основанные на электровзрыве в конденсированной среде, такой как вода, получили устойчивое распространение в современной промышленной практике. В зависимости от поставленных задач такие технологии применяются как в условиях свободных объемов, так и в специализированных герметичных разрядных устройствах (разрядных камерах). Область их использования охватывает широкий круг прикладных задач, включая целенаправленное воздействие на структуру и свойства материалов [1–3], повышение продуктивности добывающих скважин за счет импульсного воздействия на призабойную зону, удаление загрязнений с поверхностей массивных литых конструкций [4–7], а также применение электровзрывных процессов в медицинских технологиях [8], аграрном секторе [9] и системах генерации акустических возмущений [10].

Их действие основано на процессе трансформации энергии электрического поля в механическую работу посредством импульсного ввода энергии в разрядный канал, который расширяется в плотной конденсированной среде (чаще всего в воде) и используется как источник

импульсных давлений. В настоящее время наибольшее распространение получили следующие способы формирования импульсных давлений: с использованием подводного высоковольтного электрического разряда (ВЭР), электрического взрыва проводников (ЭВП) и высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ) [11–16].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Настоящая статья посвящена исследованию высоковольтного электрического разряда в воде, протекающего без предварительного инициирования пробоя проводником или введения химических компонентов. Такой тип разряда является базовым и наиболее часто реализуемым в разрядно-импульсных технологиях. В качестве ключевого объекта исследования рассматривается предпробивная стадия, при этом особое внимание уделяется влиянию параметров жидкой среды на формирование разрядного канала и эффективность протекания разрядного процесса. С целью экспериментального анализа развития данного процесса от момента подачи высокого напряжения через предпробивную

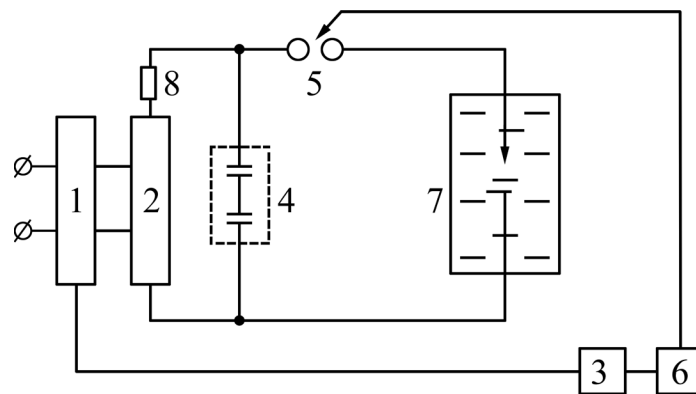


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда.

стадию и непосредственно до пробоя разрядного промежутка было принято решение провести дополнительные углубленные исследования с фиксацией временных зависимостей импульса давления и периода пульсации парогазовой полости.

Все исследования проводились на специально разработанном экспериментальном стенде, структурная схема которого приведена на рис. 1, где 1 – регулировочный трехфазный трансформатор масляный РТТМ 25/0,5 (его основное предназначение – питание технологических установок, требующих глубокой плавной регулировки или стабилизации напряжения; в данном случае он применен для регулирования питающего напряжения высоковольтного выпрямителя-трансформатора ВТМ 15/50 и, соответственно, зарядного напряжения; регулировку напряжения осуществляют с пульта управления); 2 – выпрямитель-трансформатор ВТМ 15/50 мощностью до 15 кВт, обеспечивающий выпрямленное выходное напряжение до 50 кВ; 3 – пульт управления; 4 – батарея импульсных конденсаторов; 5 – воздушный управляемый разрядник; 6 – блок поджига; 7 – разрядная камера; 8 – зарядное сопротивление.

Экспериментальные исследования проводились при следующих параметрах разрядного контура: индуктивность – $3,58 \times 10^{-6}$ Гн, собственное сопротивление контура – 0,148 Ом, емкость накопителя электрической энергии – $1,24 \times 10^{-6}$ Ф и зарядное напряжение – 25×10^3 В. Калибровочные коэффициенты датчиков тока и напряжения определялись с использованием испытаний короткого замыкания и холостого хода и составили: коэффициент преобразования для пояса Роговского $K_i = 1039$ А/В и коэффициент преобразования для делителя напряжения $K_u = 2311$ В/В.

Эксперимент проводился в открытом технологическом баке кубической формы с использованием электродной системы типа «острие–острие» с диаметром электродов 6 мм и межэлектродным промежутком 10 мм.

Численная обработка полученных осциллограмм тока и напряжения позволила исследовать временные зависимости параметров разрядного контура, характеризующих процесс преобразования энергии на данном этапе.

При обработке экспериментальных данных принципиально важно обеспечить фазовую согласованность временных зависимостей тока и напряжения, поскольку полезная работа в электрической цепи определяется активной мощностью. Последняя рассчитывается как произведение напряжения на активную (в фазе с напряжением) составляющую тока, что требует корректного учета фазовых соотношений между измеряемыми сигналами. Для достижения этого осциллограммы регистрировались в синхронном режиме тока. В реальных условиях наличие индуктивности разрядного контура вызывает межфазовый сдвиг между током и напряжением. Для синхронизации результатов использовалась компенсационная катушка, подключаемая последовательно с делителем напряжения и компенсирующая индуктивную составляющую напряжения всего разрядного контура. Конструктивно катушка представляет собой тороид, намотанный на изоляционное кольцо и установленный соосно на потенциальном электроде. Необходимое количество витков определялось в ходе наладки измерений.

На рис. 2 представлены осциллограммы временных зависимостей тока и напряжения при высоковольтном пробое водного промежутка, демонстрирующие описанные стадии развития электровзрыва в воде.

Как видно, на предпробивной стадии, продолжительность которой в данном опыте составляет 26 мкс, напряжение значительно снижается от зарядного значения 25 кВ до 11,5 кВ. При этом электрический ток незначителен и по выбранному масштабу близок к нулю. В течение предпробивной стадии в водной среде протекают процессы преобразования электрической энергии, связанные с локальным

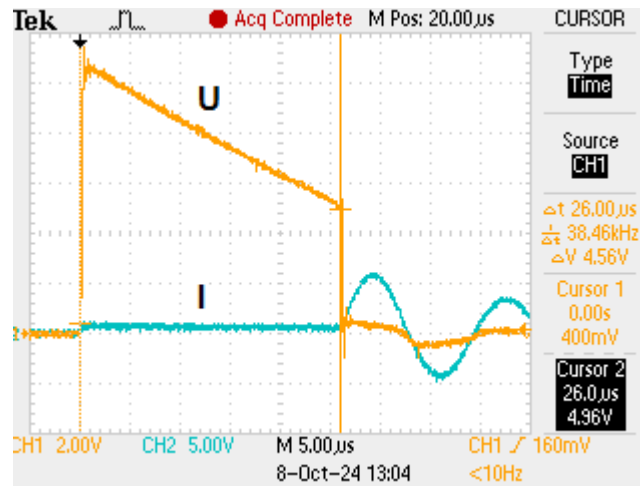


Рис. 2. Осциллограммы (временные профили) тока (I) и напряжения (U) при высоковольтном пробое водного промежутка.

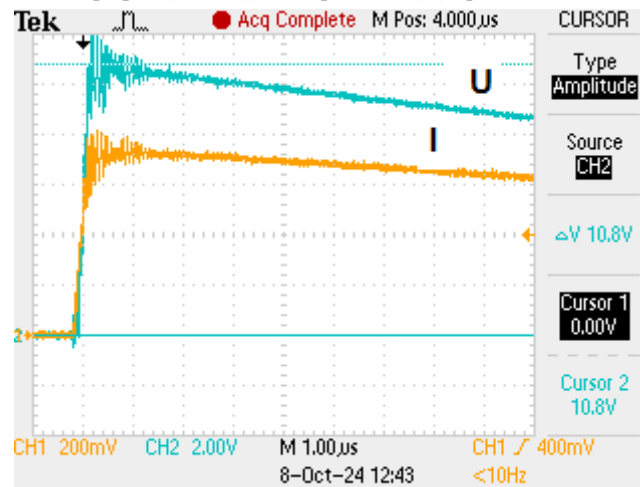


Рис. 3. Временные зависимости тока (I) и напряжения (U) на предпробивной стадии высоковольтного пробоя водного промежутка.

перегревом жидкости вблизи высоковольтного электрода, образованием парогазовых полостей и последующим развитием стримерных структур. Эти процессы приводят к пробое межэлектродного промежутка и формированию плазменного канала, который характеризуется колебательным режимом разрядного тока и напряжения на промежутке.

В ходе исследования использование дополнительных осциллографов с соответствующими масштабами измерения позволило фиксировать более детальные этапы процесса. На рис. 3 представлены временные зависимости тока и напряжения начальной предпробивной стадии (до 9 мкс). Анализ этих данных показал, что накопленная энергия рассеивается в водную среду, которая для гидроимпульсного разряда представляет собой омическую нагрузку, при этом временная зависимость тока аналогична форме напряжения, а максимальное (начальное) значение тока в данном эксперименте составило 748 А.

Численная обработка полученных характеристик позволила определить временные зави-

симости электрического сопротивления канала разряда R_k (рис. 4), мощности N_k (рис. 5) и энергии, рассеиваемой в среде W_k (рис. 6).

Тенденция снижения сопротивления (рис. 4) в сочетании с анализом рис. 3 указывает на то, что с течением времени ток затухает медленнее, чем напряжение. При этом электрическая мощность (рис. 5) также демонстрирует затухающий характер.

Начальное значение активного сопротивления составляет 33,4 Ом.

Начальное значение электрической мощности составляет 18,7 МВт.

В свою очередь величина энергии W_k , рассеиваемой в среде, постепенно увеличивается (рис. 6) и за 9 мкс достигает 142 Дж. Для сравнения на рис. 6 приведено значение накопленной энергии $W_0 = 387,5$ Дж.

При исследовании важно подробно рассмотреть завершающий этап предпробивной стадии, в ходе которого в разрядном промежутке с высокой скоростью формируется плазменный канал. Данный момент представлен на рис. 7, где временные зависимости тока и напряжения

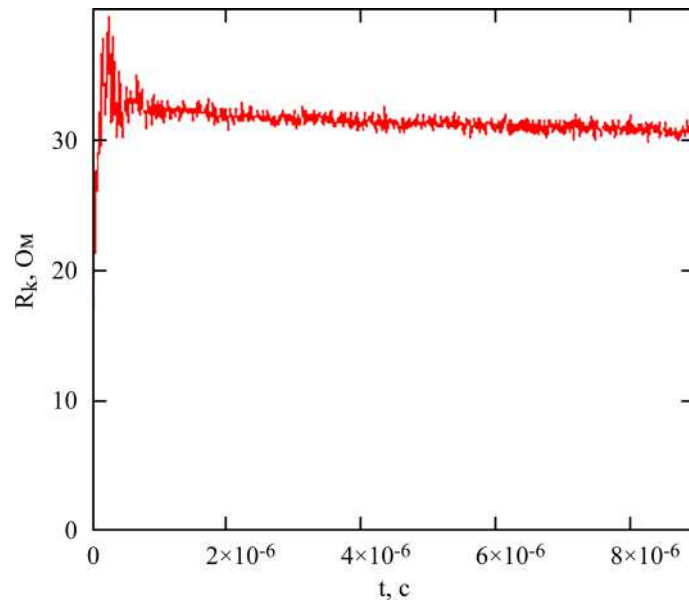


Рис. 4. Временная зависимость электрического сопротивления межэлектродного промежутка на начальной предпробивной стадии высоковольтного пробоя.

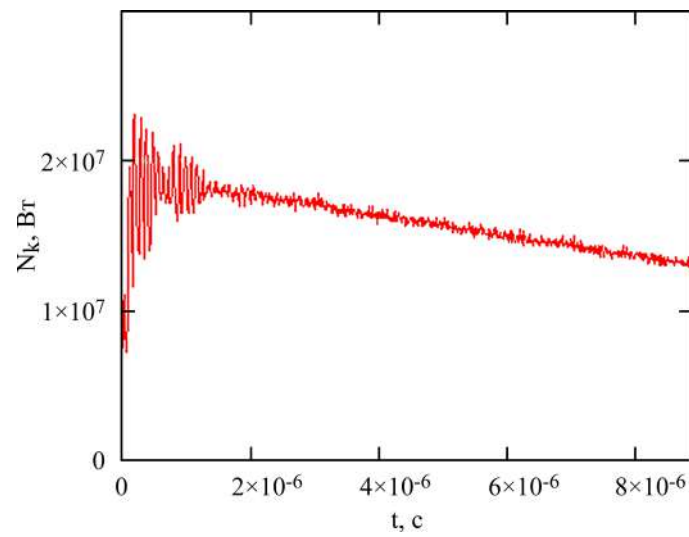


Рис. 5. Временная зависимость электрической мощности на начальной предпробивной стадии высоковольтного пробоя водного промежутка.

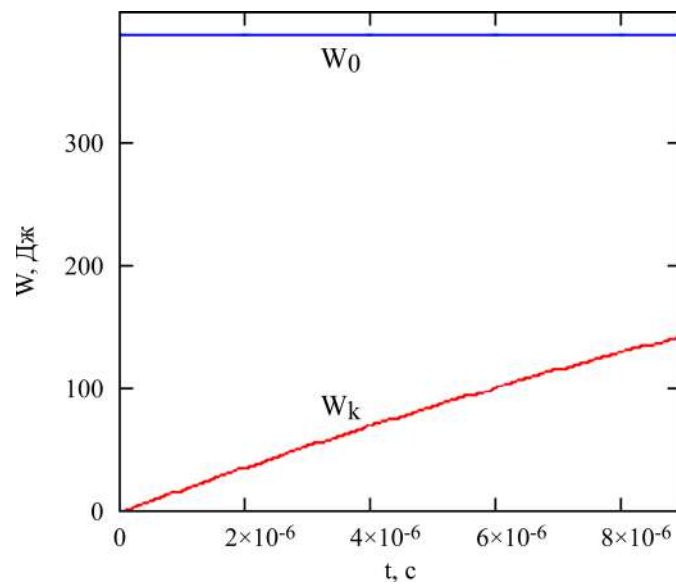


Рис. 6. Временная зависимость электрической энергии, рассеиваемой в среде, на начальной предпробивной стадии высоковольтного пробоя водного промежутка.

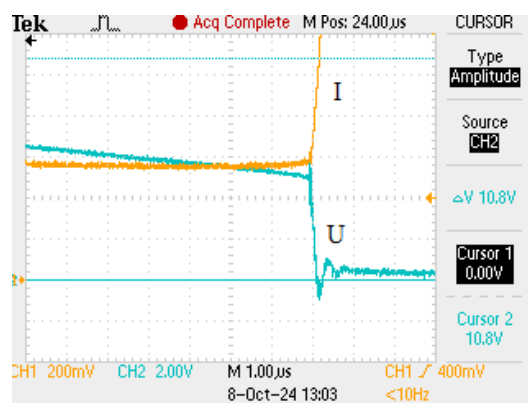


Рис. 7. Временные зависимости тока и напряжения при переходе от предпробивной стадии к колебательному режиму.

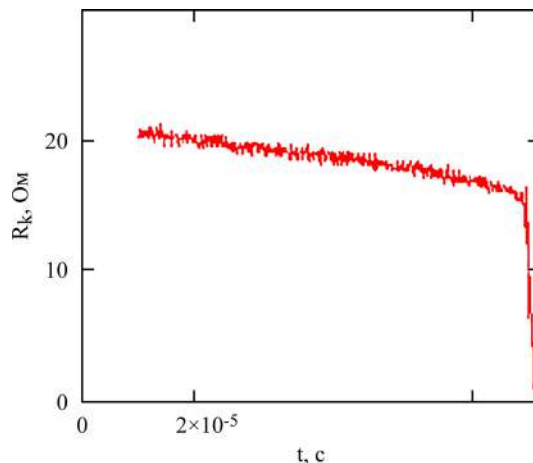


Рис. 8. Временная зависимость электрического сопротивления межэлектродного промежутка в момент высоковольтного пробоя.

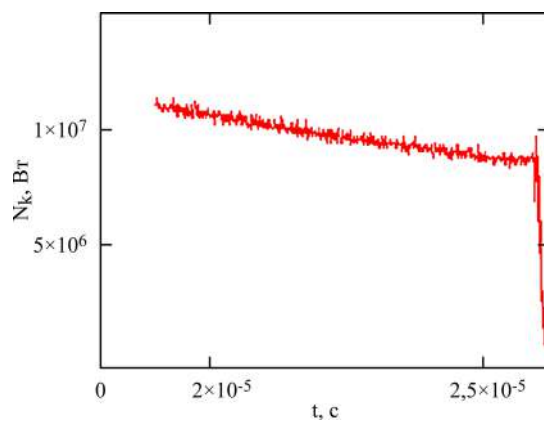


Рис. 9. Временная зависимость электрической мощности в момент высоковольтного пробоя.

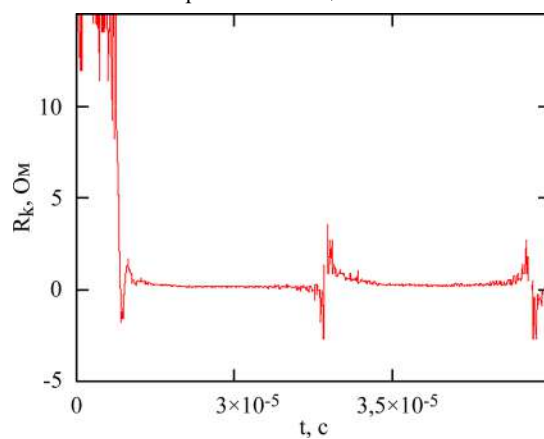


Рис. 10. Временная зависимость электрического сопротивления межэлектродного промежутка после высоковольтного пробоя.

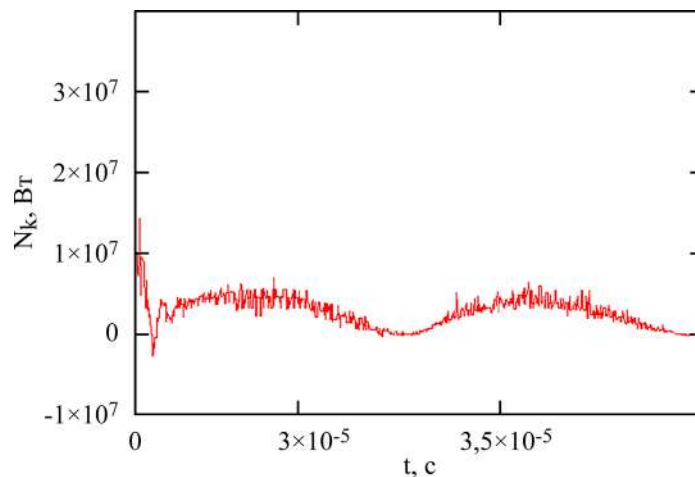


Рис. 11. Временная зависимость электрической мощности после высоковольтного пробоя.

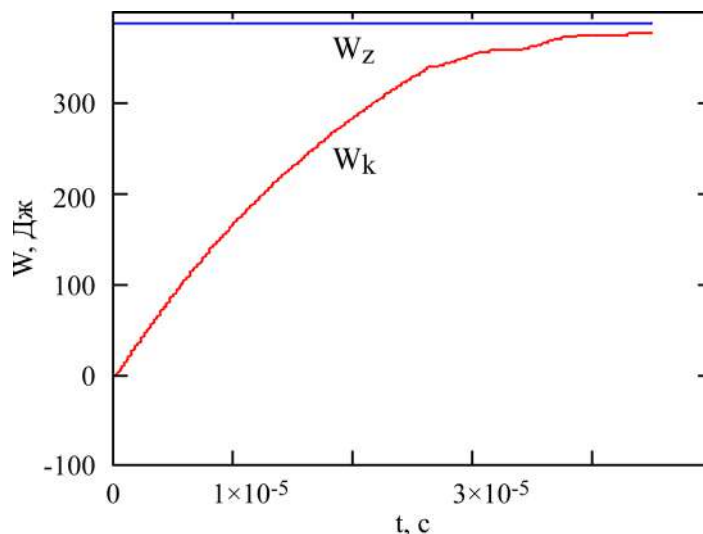


Рис. 12. Временная зависимость электрической энергии, рассеиваемой на разрядном промежутке, в течение всего процесса высоковольтного пробоя водного промежутка.

приведены в интервале времени от 19 до 29 мкс и в тех же масштабах, что и на рис. 3.

Следует отметить, что временная зависимость тока, имеющая спадающий характер на начальном этапе процесса (рис. 3), в дальнейшем не только замедлила свой спад, но и перешла к нарастанию (рис. 7), что связано с развитием стримерных образований и увеличением проводящей области в межэлектродном промежутке. В конце предпробивной стадии в рассматриваемом эксперименте напряжение составляло 11,5 кВ, а ток – 607 А. В момент пробоя, как видно из рис. 6, происходит резкое снижение напряжения, в то время как ток, напротив, резко возрастает, вследствие чего при выбранном масштабе его амплитуда выходит за пределы экрана осциллографа. Численная обработка данных осциллограмм позволила определить временную зависимость электрического сопротивления разрядного промежутка (рис. 8). В начале рассматриваемого временного интервала сопротивление составляло 20,3 Ом (в начале процесса – 33,4 Ом), к моменту пробоя оно плавно уменьшалось до 15,1 Ом, после чего

резко снизилось до 0,6 Ом, что соответствует сопротивлению сформировавшегося плазменного канала.

Аналогичная ситуация имеет место и для временной зависимости электрической мощности (рис. 9), которая до момента пробоя сохраняет затухающий характер, спадая до значения – 6,98 МВт, а в момент пробоя резко уменьшается.

В то же время численная обработка осциллограмм, представленных на рис. 1, позволяет восстановить недостающие участки временных зависимостей электрического сопротивления (рис. 10) и мощности (рис. 11). Как видно, сопротивление плазменного канала в момент максимума амплитуды тока принимает значение порядка 0,2 Ом, при этом временная зависимость мощности имеет вид затухающих полуволн положительной полярности.

Численная обработка осциллограмм всего процесса высоковольтного пробоя водного промежутка позволила определить временную зависимость электрической энергии, выделяемой в межэлектродном промежутке (рис. 12), на

протяжении всего процесса пробоя. При этом следует отметить, что в случае рассматриваемого эксперимента на предпробивной стадии (в течение первых 26 мкс) имеют место большие потери энергии, которые составляют порядка 87% от запасенной, что абсолютно не рационально и требует принятия определенных мер по снижению этих потерь.

ВЫВОДЫ

Эксперименты показали, что на предпробивной стадии формирование плазменного канала сопровождается постепенным снижением сопротивления разрядного промежутка и замедленным затуханием тока по сравнению с напряжением, что отражает накопление и перераспределение энергии в воде. В момент пробоя наблюдается резкое возрастание тока и падение напряжения, при этом сопротивление промежутка резко уменьшается до значений, характерных для плазменного канала, что подтверждает колебательный характер разрядного процесса.

Численная обработка временных зависимостей тока, напряжения, сопротивления и мощности позволяет количественно оценить динамику преобразования энергии и выявить ключевые моменты формирования разряда в микро- и наносекундном масштабе.

Полученные данные представляют ценную экспериментальную базу для разработки моделей электровзрыва в воде и могут быть использованы для повышения эффективности и точности разрядно-импульсных технологий в инженерных приложениях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Wang, X., and Zhu, J., Research and Applications of High-voltage Pulse Discharge Crushing, *European Journal of Electrical Engineering*, 2019, vol. 21, no. 2, p. 157.
<https://doi.org/10.18280/ejee.210205>
- Banozic, M., Jozinovic, A., Grgic, J., Milicevic, B., et al., High Voltage Electric Discharge for Recovery of Chlorogenic Acid from Tobacco Waste, *Sustainability*, 2021, vol. 13, p. 4481.
<https://doi.org/10.3390/su13084481>
- Rizun, A. R., Denisyuk, and T.D., Domershchikova, A.O., Electric discharge in the process for recovering the wastes of printed circuit boards, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2017, vol. 53, no. 6, p. 592.
<https://doi.org/10.3103/S1068375517060096>
- Lee, K., Chung, K., Hwang, Y.S., and Kim, C.Y., Underwater spark discharge with long transmission line for cleaning horizontal wells, *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121, art. ID 243302.
<https://doi.org/10.1063/1.4986634>
- Chung, K., Lee, K., Hwang, Y.S., and Kim, C.Y., Modeling of Pulsed Spark Discharge in Water and Its Application to Well Cleaning, *Current Applied Physics*, 2015, vol. 15, no. 9, p. 977.
[doi: 10.1016/j.cap.2015.05.010](https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.05.010)
- Хвоцан, О.В., Смирнов, О.П., Залежність енергетичних процесів високовольтних електророзрядних свердловинних комплексів СКІФ від характеристик навантаження, *Технічна електродинаміка*, 2022, №1, с. 58.
<https://doi.org/10.15407/techned2022.01.058>
- Smirnov, A.P., Kosenkov, V.M., Zhekul, V.G., and Poklonov, S.G., The Study of the Effect of the Electrodischarge Action Modes on Viscous Deposits in Cylindrical Channels, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2010, vol. 46, no. 3, p. 237.
<https://doi.org/10.3103/S1068375510030087>
- Sato, M., Sakugawa, T., Yamashita, T., and Hosano, N., Effects of Voltage and Current Waveforms on Pulse Discharge Energy Transfer to Underwater Shock Waves for Medical Applications, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, vol. 48, no. 7, p. 2639.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2992638>
- Marcek, T., Kovac, T., Jukic, K., Loncaric, A., et al., Application of High Voltage Electrical Discharge Treatment to Improve Wheat Germination and Early Growth under Drought and Salinity Conditions, *Plants*, 2021, vol. 10, p. 2137.
<https://doi.org/10.3390/plants10102137>
- Liang, Qiao, Xiaobing, Zhang, Bing, Yan, Yang, Liu, et al., An underwater discharge shockwave separation method based on minimum-phase cepstrum, *AIP Advances*, 2021, no. 11, art. ID 095109.
<https://doi.org/10.1063/5.0064322>
- Гулый, Г.А., *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990, 208 с.
- Ищенко, Ж.Н., Поздеев, В.А., *Деформирование и запрессовка труб электровзрывом*, Николаев: Атолл, 2003, 212 с.
- Кривицкий, Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкостях*. Киев: Наукова думка, 1986, 208 с.
- Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Муштатный, Г.П., Импульсные электроразрядные технологии в строительстве, *Будівництво України*. 2008, № 10, с. 29.
- Герасимов, Б.В., Поздеев, В.А., Высоковольтный электрохимический взрыв в разрядно-импульсной технологии запрессовки труб в трубных решетках. Сборник научных трудов ИИПТ НАН Украины. Физико-технические аспекты электровзрывного

преобразования энергии, Киев: Наукова думка, 1990, с. 85.

16. Uri, Andres, Aggregate breakdown by high voltage electrical pulse. G.B. Patent 2421203, 2006.

Summary

This paper presents the results of experimental investigations of a high-voltage electrical discharge (HVD) in water during the high-voltage breakdown of an interelectrode gap, which is the most common operating mode in discharge-pulse technologies. The main focus was placed on the analysis of the pre-breakdown stage of the discharge, during which the conditions for a breakdown initiation and plasma channel formation were established, as well as on evaluating the efficiency of the discharge process. Oscilloscopes with different time scales were used to record the processes, allowing a

detailed measurement of the temporal behavior of the current, voltage, electrical resistance, power, and energy dissipated in the medium and released across the load. An analysis of the oscillograms showed that during the pre-breakdown stage, the current decays more slowly than the voltage, while the dissipated energy gradually increases. At the moment of a breakdown, a sharp decrease in voltage and a rapid increase in current were observed, accompanied by a reduction in the resistance of the discharge gap to a value characteristic of a plasma channel. The obtained time dependences of the electrical resistance, power, and energy make it possible to evaluate the dynamics of energy conversion during a discharge formation.

Keywords: high-voltage discharge, pre-breakdown stage, plasma channel, discharge-pulse technologies, discharge energy