

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 537.523.4

**ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА,
РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ,
НА ДИНАМИКУ НАРАБОТКИ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА
В ЖИДКОСТИ**И. В. Моряков¹, В. В. Гудкова^{1,2} М. А. Зимина^{1,2}

Основной целью проведенных исследований являлось изучение высоковольтного импульсно-периодического поверхностного разряда, распространяющегося вдоль границы вода–газ, когда в качестве газовой среды использовался аргон и кислород. В экспериментах применялся генератор с энергией накопительного конденсатора 1.6 Дж, напряжением 20 кВ, длительность импульса 2...3 мкс. В экспериментах менялась длина разрядного канала в диапазоне от 3 до 15 см. Определена средняя скорость распространения разряда вдоль поверхности воды в атмосфере Ar и O₂. Показано, что скорость лидера в аргоне в два раза больше, чем в кислороде. Проведены количественные измерения синтезированного под действием разряда пероксида водорода в жидкости. Установлено, что наработка пероксида водорода линейно зависит от длины разрядного канала в диапазоне от 3 до 9 см как при использовании в качестве рабочего газа аргона, так и кислорода.

Ключевые слова: скользящий по поверхности воды разряд, плазменная активация жидкости, пероксид водорода, искровой разряд.

Введение. В последнее время активно ведутся исследования в области плазможидкостного взаимодействия с целью внедрения плазменных методов для решения при-

¹ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: igor_miw@mail.ru.

² РУДН, 117198 Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

кладных задач [1, 2]. Это связано с большим разнообразием подходов к генерации плазмы, которые дают возможность получать широкий диапазон продуктов плазмо-химических реакций.

Взаимодействующая с жидкостью плазма активно изучается для понимания таких фундаментальных процессов, как перенос реакционноспособных частиц из плазмы в жидкость и для синтеза новых наноматериалов [3]. Особое распространение получили активированные плазмой жидкости [4, 5], которые имеют большие перспективы для внедрения в медицине [6], сельском хозяйстве [7] и экологии [8].

При этом особое внимание уделяется переходу от лабораторных исследований к методам и устройствам, которые будут использоваться непосредственно в промышленности. Плазменные методы должны быть легко масштабируемыми, устройства генерации плазмы надежными, энергоэффективными и портативными [1].

Внедрение плазменных методов зависит от эффективности генерации возникших в ходе плазможидкостного взаимодействия частиц и химических соединений. Ранее для решения данной задачи в многоискровой разрядной системе нами применялся подход, позволявший быстро перемешивать продукты реакций [9, 10]. В настоящей работе для этой цели предлагается использовать разрядную систему с большим отношением объема обрабатываемой жидкости к площади плазможидкостного взаимодействия [11].

Актуальность работы подкрепляется тем, что сам процесс плазможидкостного взаимодействия достаточно сложен для моделирования, что делает необходимым получение экспериментальных измерений концентраций активных форм кислорода и азота, в т. ч. пероксида водорода.

Процессы, происходящие на границе газ–плазма–жидкость имеют сложную природу. В этой связи одна из ключевых экспериментальных задач состояла в необходимости добиться хорошей воспроизводимости экспериментальных результатов. Известно, что при контакте плазмы с водой или водными растворами в жидкой среде образуются сильные окислители, такие как гидроксил-радикал ($\text{OH}\cdot$), атомарный кислород ($\text{O}\cdot$) и перекись водорода (H_2O_2).

В данной работе приводятся количественные результаты по наработке пероксида водорода в воде в зависимости от длины разрядного канала. При этом разряд инициировался в атмосфере аргона и кислорода. По вольт-амперным характеристикам была определена средняя скорость движения лидера по поверхности жидкости.

Экспериментальная установка. На рис. 1 приведена схема реактора. Его конструкция позволяла работать как в замкнутом объеме, так и с прокачкой газа.

Прямоугольная кювета из оргстекла (1) заполнялась водой (2). Объем рабочей камеры (1) реактора составлял 300 см^3 (при этом камера на 200 мл заполнялась водой, остальной объём – газом Ar и O_2). Электроды (3), (4) выполнены из алюминиевого провода сечением 1.6 мм (чистота металла в используемом сплаве 99.7%). Материал электродов был выбран из тех обстоятельств, что при нейтральном pH воды Al не образует растворов в воде – это облегчает анализ и интерпретацию полученных результатов. Отрицательный электрод (4) имел надводную и подводную части (подводная часть имела длину 15 см и глубину погружения 0.5...1 см и была необходима для обеспечения прямолинейного распространения разряда). Положительные электроды (3) были заострены и располагались над водой на расстоянии $x = 7$ мм от ее поверхности. В разрядной камере можно было варьировать длину разрядного канала $L = 3, 6, 9, 12$ и 15 см.

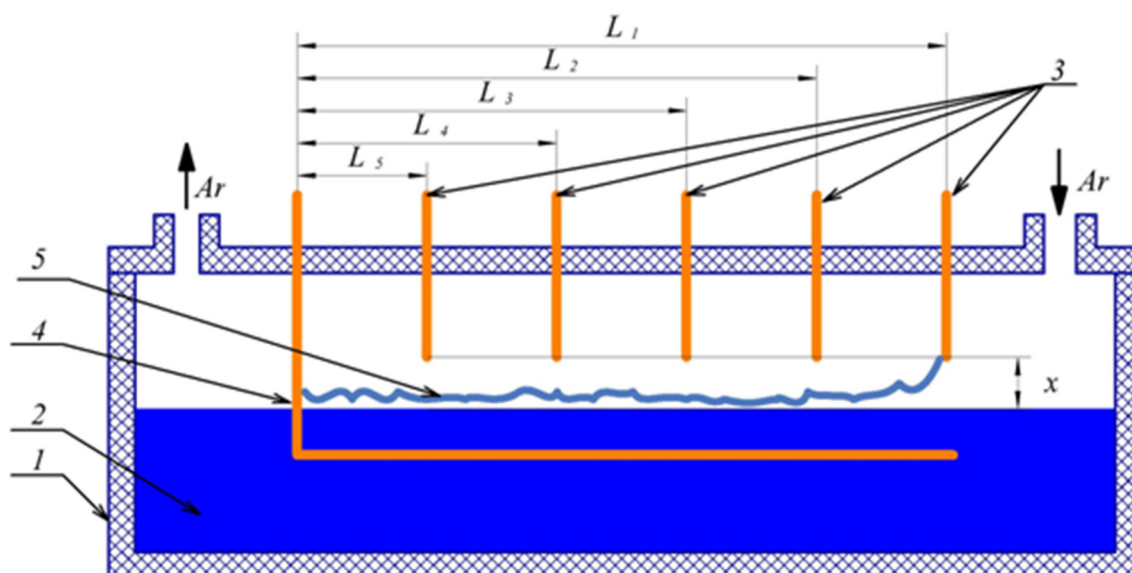


Рис. 1: Схема реактора. 1 – кювета и крышка из оргстекла; 2 – вода; 3 – высоковольтный электрод, 4 – электрод под земляным потенциалом; 5 – плазменный канал.

В эксперименте скорость потока газа составляла 2 л/мин. Питание осуществлялось импульсным генератором ($U_H \leq 20$ кВ) с накопительной емкостью $C = 10^{-8}$ Ф с тиратронной схемой запуска (энергия накопительного конденсатора $E_{\text{и}} \leq 1.6$ Дж). Частота следования импульсов 25 Гц.

Для регистрации тока и напряжения использовались токосъемник Keysight (Agilent/HP) 8710-1744 и делитель напряжения 1:1000 (Tektronix P6015A), соответственно. Сигналы подавались на вход двухлучевого осциллографа (Tektronix TDS 1002B).

При измерении проводимости воды использовался кондуктометр HANNA DIST-5 HI 98312.

Концентрации долгоживущих активных форм кислорода (пероксид водорода) измерялась с помощью спектрофотометра (HACH LANGE DR-5000). При измерении пероксида водорода для измерений использовался метод, основанный на взаимодействии пероксида водорода и сульфата титана (IV) с образованием желтого комплекса с выраженной полосой на спектрах поглощения с максимумом на 410 нм: $\text{Ti}^{4+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow [\text{TiO}(\text{H}_2\text{O}_2)]^{2+}$. Перед началом измерений проводится процедура калибровки по растворам с известной концентрацией искомым соединений в линейном диапазоне [12].

Экспериментальные результаты и обсуждение. При подаче высоковольтного напряжения происходит пробой разрядного промежутка по поверхности воды. Особенность проведенного эксперимента состоит в том, что разряд распространяется по поверхности жидкости в парогазовой среде. Возникающий разрядный канал является источником ударных волн в газовой среде. Это, в свою очередь, приводит к возникновению волн на поверхности жидкости. При работе в частотном режиме данный эффект носит паразитный характер и создаёт ограничения на предельную частоту подачи импульсов (инициирования разряда). Так, например, при частоте 50 Гц возникающие на поверхности жидкости волны “оголяют” подводный токопровод, что приводит к замыканию системы. Поэтому в эксперименте частота посылок высоковольтных импульсов была ограничена 25 Гц. Также возникающие на поверхности жидкости волны препятствовали устойчивой инициации разряда, что в конечном итоге приводило к плохой воспроизводимости результатов по наработке пероксида водорода в жидкости.

Вольт-амперные характеристики. На рис. 2 представлены зависимости тока и напряжения от времени для случаев, когда рабочим газом были кислород (а) и аргон (б) при длине разрядного канала $L = 9$ см. Отметим, что при использовании кислорода искровой пробой длиной более 9 см невозможно было инициировать.

Из приведенных осциллограмм следует, что разряд протекает две стадии: слаботочная лидерная (1) и сильноточная искровая (2) [13]. При распространении разряда в атмосфере аргона длительность лидерной стадии составила $t = 0.25$ мкс, ток $I \sim 25$ А. При распространении разряда в атмосфере кислорода длительность лидерной стадии увеличилась до $t = 0.5$ мкс, ток уменьшился и составил $I \sim 20$ А. Учитывая, что в обоих случаях длина искрового канала составляла 9 см, скорости лидера в атмосфере аргона и кислорода составили, соответственно, $V = 4 \cdot 10^7$ см/с и $V = 2 \cdot 10^7$ см/с. Отметим, что на стадии 1 ток замыкается через воду, поэтому значительная часть

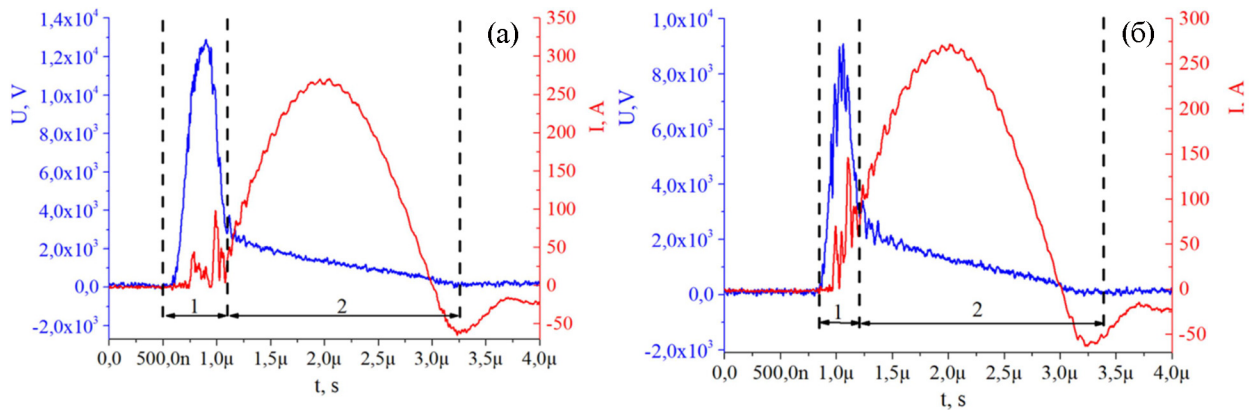


Рис. 2: Осциллограммы тока и напряжения, соответствующие разряду на поверхности воды, распространяющемуся в атмосфере кислорода (а) и аргона (б). Длина разрядного канала $L = 9$ см. 1 – стадия распространения лидера, 2 – искровая стадия.

энергии выделяется в воде. При этом на стадии 2 основная энергия выделяется в высокопроводящем искровом канале.

Химические измерения. Было проведено два эксперимента по обработке воды плазмой поверхностного разряда. В одном случае разряд формировался в атмосфере аргона, во втором – кислорода.

Т а б л и ц а 1

Измеренные значения водородного показателя среды и проводимости, обработанных разрядом водных растворов

Длина разрядного канала L , см	Рабочий газ аргон		Рабочий газ кислород	
	pH	Проводимость, мкСм/см	pH	Проводимость, мкСм/см
3	5.6	2.1	5.4	23
6	5.4	3.1	5.5	3.0
9	5.7	4.4	5.5	4.4
12	5.2	4.7		
15	5.4	4.1		

Деионизованная вода объемом 200 мл заливалась в реакторную камеру, после чего на протяжении 8 минут с частотой 25 Гц проходила обработка жидкости. При этом варьировалась длина канала $L = 3, 6, 9, 12$ и 15 см для разряда в атмосфере аргона и,

соответственно, $L = 3, 6$ и 9 см для кислорода. Для каждой длины разряда проводились количественные измерения наработки пероксида водорода в обрабатываемых растворах (результаты приведены на рис. 3) – три раза для каждой точки, также фиксировался водородный показатель (pH) и электрическая проводимость (табл. 1).

Из приведенных результатов видно, что под действием разряда водородный показатель практически не изменяется относительно первоначального значения $pH = 5.8 \dots 6.0$. Электрическая проводимость плазменно-активированных водных растворов возрастает более, чем на порядок по сравнению с первоначальным значением 0.1 мкСм/см по мере увеличения длины разрядного канала. При этом значения проводимости находятся существенно ниже уровня, при котором это бы оказывало влияние на процесс распространения разряда.

Количественные измерения пероксида водорода в жидкости (рис. 3) показали, что его выход линейно зависит от длины поверхностного разряда как для случая аргона, так и кислорода. В экспериментах с использованием аргона в диапазоне L от 3 до 12 см выход пероксида водорода в среднем составлял ~ 150 мкМ/см. При увеличении длины разрядного канала более 12 см эффективность наработки пероксида водорода уменьшилась, что может объясняться падением эффективности вложения энергии в разряд [11], а также достижением плазмохимического динамического равновесия (процессы синтеза пероксида водорода уравниваются процессами его распада). В дальнейшем планируется провести дополнительные эксперименты для прояснения данного вопроса.

В экспериментах, когда разряд распространялся в атмосфере кислорода, выход перекиси в диапазоне L от 3 до 9 см составлял в среднем ~ 110 мкМ/см, что на 30% меньше, чем в случае использования аргона. Данный результат согласуется с приведенными ранее результатами по скорости распространения лидера.

Ранее в работе [11] нами было показано, что выход УФ-излучения практически постоянен по длине поверхностного разряда, слабо зависит от длины разрядного канала и прямо пропорционален энергии, вкладываемой в разряд, концентрация гидроксильных радикалов в жидкости также пропорциональна энергии, вкладываемой в разряд, линейно возрастает с увеличением длины плазменного канала L (атмосфера аргона). Интересно сравнить разные пути образования пероксида водорода – в газовой фазе под действием УФ-излучения и непосредственно в жидкости при рекомбинации гидроксильных радикалов. Были проведены эксперименты, в которых газ из разрядной зоны барботировался через дополнительный объем чистой воды. По итогам измерений в дополнительном объеме не было зафиксировано наличие пероксида водорода в пределах

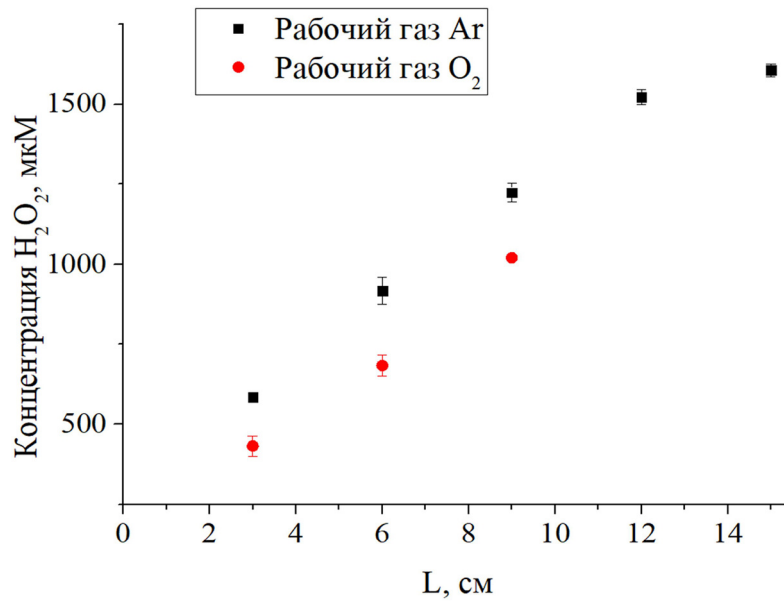


Рис. 3: Зависимость концентрации пероксида водорода для разряда, распространяющегося в атмосфере аргона и кислорода в зависимости от длины разрядного канала.

чувствительности измерений, что говорит о пренебрежимо малом вкладе механизма образования пероксида водорода в газовой фазе.

Сравним полученные результаты с измерениями, проведенными на том же источнике питания для кольцевого многоискрового источника плазмы с электродами из дюралюминия [9] и аргоном в качестве рабочего газа. В данных экспериментах при прочих равных параметрах источника питания частота следования высоковольтных импульсов 50 Гц и времени обработки воды в течение 4 минут была получена концентрация пероксида водорода на уровне 400 мкМ. При этом затраты энергии от источника в экспериментах в [9] составили 150 Дж/см³. В данной работе во всех экспериментах вклад энергии от источника питания в жидкость составлял 100 Дж/см³. При этом сопоставимое количество пероксида водорода в жидкости – 500 мкМ – было получено уже при длине разрядного канала 3 см. Тем самым, увеличивая длину поверхностного разряда, в пределах можно повысить эффективность наработки пероксида водорода в 4 раза, не меняя исходные параметры источника питания.

Заключение. Проведены исследования скользящего поверхностного разряда. Отличительная особенность экспериментов состояла в том, что плазма разряда генерируется непосредственно у границы раздела жидкость–газ.

По измеренным вольт-амперным характеристикам разряда рассчитаны скорости распространения лидера. Показано, что скорость лидера в атмосфере аргона в два раза больше, чем для кислорода.

В экспериментах зафиксировано, что наработка пероксида водорода в жидкости линейно зависит от длины разрядного канала как в случае использования аргона ~ 150 мкМ/см, так и для кислорода ~ 110 мкМ/см. При этом было показано, что вклад механизма образования пероксида водорода в газовой фазе под действием УФ-излучения пренебрежимо мал.

Проведенные эксперименты продемонстрировали потенциальные возможности подхода к организации разряда, при котором реализуется большое отношение объема обрабатываемой жидкости к площади плазможидкостного взаимодействия, по увеличению наработки пероксида водорода. В то же время при этом способе организации разряда возникают ограничения на максимальную частоту подачи импульсов и энергетику в импульсе.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-29-00736 по теме “Создание плазменно-активированных водных растворов для нужд отечественного агропромышленного комплекса при помощи многоискрового источника плазмы с инъекцией газа в межэлектродное пространство”.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] I. Adamovich, S. Agarwal, E. Ahedo, et al., *Journal of Physics D: Applied Physics* **55**, (2025). DOI: 373001. 10.1088/1361-6463/ac5e1c.
- [2] P. J. Bruggeman, M. J. Kushner, B. R. Locke, et al., *Plasma Sources Science and Technology* **1** (2016). <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/0530022>.
- [3] P. J. Bruggeman, F. Iza, R. Brandenburg, *Plasma Sources Science and Technology* **26**(12), (2017). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa97af>.
- [4] K. S. Wong, N. S. L. Chew, M. Low, M. K. Tan, *Plasma-Activated Water: Physicochemical Properties, Generation Techniques, and Applications. Processes* **11**, 2213 (2023). <https://doi.org/10.3390/pr11072213>.
- [5] S. A. Sajib, M. Billah, S. Mahmud, et al., *Plasma Chem. Plasma Process* **40**, 119 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11090-019-10028-3>.
- [6] M. Laroussi, S. Bekeschus, M. Keidar, et al., *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences* **6**(2), 127 (2022). DOI: 10.1109/TRPMS.2021.3135118.

- [7] K. Takaki, K. Takahashi, N. Hayashi, et al., *Reviews of Modern Plasma Physics* **5**(12), (2021). <https://doi.org/10.1007/s41614-021-00059-9>.
- [8] A. Hamdan, J.L. Liu, M. S. Cha, *Plasma Chem Plasma Process* **38**, 1003 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11090-018-9918-y>.
- [9] I. V. Moryakov, V. V. Gudkova, M. A. Zimina, A. M. Anpilov, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **52**(3), 133 (2025). DOI: 10.3103/S1068335624602115. EDN IPQQPP.
- [10] A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov, I. A. Kossyi, et al., *Technical Physics* **66**(5), 675 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221050029.
- [11] A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov, Yu. N. Kozlov, et al., *Plasma Physics Reports* **49**(8), 961 (2023). DOI: 10.1134/s1063780x23600901.
- [12] D. A. Shutov et al., *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **43**, 577 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11090-023-10322-1>.
- [13] Э. М. Базелян, *Искровой разряд* (М., МФТИ, 1997), p. 320.

Поступила в редакцию 12 сентября 2025 г.

После доработки 23 октября 2025 г.

Принята к публикации 24 октября 2025 г.