

УДК 537.52
EDN: ASUTAS

PACS: 52.80.Wq

**Получение периодического распределения пузырьков газа
и развитие электрического разряда в воде**

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

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Россия

* E-mail: panovvladislav@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23.04.2026; после доработки 20.05.2026; принята к публикации 06.08.2026

Исследовано развитие электрического разряда в жидкости в присутствии распределенной газовой фазы. Показано, что процесс протекает иначе, чем в однофазной среде, вследствие более быстрых ионизационных процессов в газе. Установлено, что усиление электрического поля на полюсах приводит к увеличению числа пузырьков, вовлеченных в развитие разряда, и к эффективному расширению области ионизации. Однако численное моделирование объединения таких центров ионизации через жидкость в единый разрядный канал затруднено из-за многомасштабности вовлеченных в расчет процессов. Предложен новый способ генерации упорядоченных цепочек газовых пузырьков в воде на основе импульсного электролиза воды, и исследуется их влияние на развитие электрического разряда.

Ключевые слова: электролиз, пузырьки, цепочки, вода, электрический разряд.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-33-39

Введение

Наличие газовой (паровой) фазы в жидкости играет большую роль в инициировании и развитии электрического разряда в жидкости, т. к. прямая ионизация в жидком состоянии теоретически возможна при высоких напряженностях поля и коротких временах его нарастания [1], однако экспериментальная реализация таких условий и регистрация ионизации в жидком состоянии до сих пор остается весьма сложной задачей [2]. Модельное представление о распространении стримера в жидких углеводородах предложено в работах Г. В. Найдиса [3, 4]. Гораздо чаще инициированию разряда предшествует этап образования в жидкости области пониженной плотности, в которой развиваются ионизационные процессы. В зависимости от условий к образованию такой области в основном приводят электрогидродинамическое течение [5–8] или вскипание [9], декомпрессия (резкое снижение давления) [10], ультразвуковое воздействие [11].

Электрогидродинамическое течение, возникающее в жидкости под действием электрического поля, может приводить к разрыву сплошности и образованию парогазового пузырька в области сильной неоднородности поля [5, 6], которая реализуется, например, вблизи острия высоковольтного электрода [7]. Такой процесс происходит на наносекундных масштабах времени.

Образование парогазовой области через вскипание характерно для более низких напряжений и длительных фронтов его нарастания [9]. Область пониженной плотности образуется там, где протекает наибольший ток, затем происходит ионизация и появление плазменного канала, который прорастает в жидкости через испарение и ионизацию.

Нередко мелкие и крупные пузыри могут уже присутствовать в жидкости до подачи напряжения. Такой класс задач – с заранее существующими пузырьками – получил отдельное развитие. Наиболее значимый вклад в расчетно-теоретические исследования сделан

в работах Н. Ю. Бабаевой и Г. В. Найдиса с соавторами [12–15], в которых исследованы случаи как одиночных пузырьков, так и случаи их упорядоченных одномерных цепочек и двумерных сеток. Показано развитие стримера внутри пузырька, а также его влияние на иницирование разрядов в соседних пузырьках (своеобразный эффект «цепной реакции»). Экспериментальная проверка результатов, полученных для упорядоченных массивов пузырьков, на сегодняшний день осложняется отсутствием способа их получения. Пробой одиночных или пары пузырьков активно исследуется [16–19], однако постановка несколько отличается от расчетной – пузырьки, как правило, контактируют с электродом и между собой для их фиксации в пространстве. Отдельно стоит упомянуть эксперимент, в котором одиночный пузырек удерживался неподвижным в объеме жидкости с помощью сфокусированного ультразвукового излучения [20].

В настоящей работе предлагается и исследуется способ получения цепочек пузырьков с помощью импульсного электролиза. Варьируя параметрами процесса электролиза можно добиться хорошей стабильности диаметра пузырьков и пространственного периода их следования. Для наиболее успешного режима зарегистрированы теневые кинограммы развития электрического пробоя промежутка в воде с распределенными парогазовыми пузырьками.

Экспериментальная установка

Для исследования электрического пробоя в воде в присутствии пузырьков газа использовалась экспериментальная установка, схематически представленная на рисунке 1. Схема состоит из системы создания пузырьков в области между электродами, систему подачи высокого напряжения между электродами, систему оптической диагностики и измерения электрических параметров процесса.

Эксперименты проводились в диэлектрической емкости объемом 0,2 л, заполненной водой, с прозрачными стенками (материал – плексиглас). Для обеспечения электрического пробоя воды в области между электродами используются высоковольтный электрод $E1$ шарообразной формы (диаметр 3 мм) и заземленный электрод $E2$ в форме диска диаметром

20 мм и высотой 5 мм. Заземленный электрод имеет центральное сквозное отверстие диаметром 2 мм, предназначенное для прохождения пузырьков в область электрического пробоя. Высокое положительное напряжение ($+HV$) с батареи конденсаторов C общей емкостью 1 мкФ, заряжаемой через балластный резистор R_b , подавалось на электрод $E1$ с помощью полупроводникового ключа S типа «полумост».

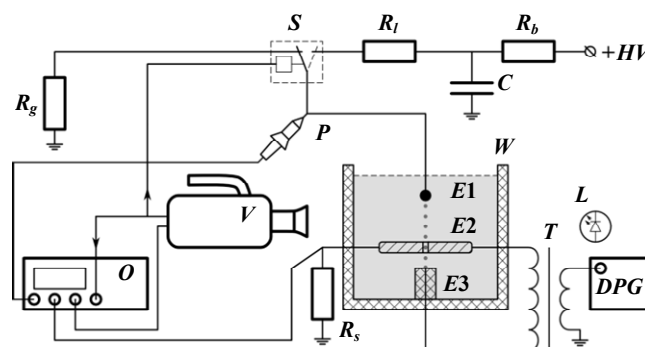


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для создания пузырьков в области между электродами $E1$ и $E2$ используется дополнительный (низковольтный) электрод $E3$, расположенный под заземленным электродом $E2$. При подаче импульсов напряжения между низковольтным электродом $E2$ и заземленным электродом $E3$ происходил электролиз воды с образованием газовых пузырьков. Диаметр электрода $E3$ составляет 0,15 мм, сам электрод запаян в диэлектрическую оболочку, что обеспечивает крайне низкое значение площади контакта электрода с жидкостью и высокую локальную плотность тока в этом месте. В конечном счете, это приводит к тому, что появление пузырьков газа оказывается локализованным – вблизи среза электрода $E3$. После отрыва пузырька от поверхности вследствие действия сил плавучести он движется вертикально вверх через отверстие в заземленном электроде. Открытие ключа S осуществлялось по сигналу с видеокамеры V , использовавшейся для визуализации процесса пробоя. Ток разряда ограничивался с помощью нагрузочного резистора R_l . Резистор R_g использовался для ограничения тока через ключ в режиме коммутации «на землю».

Взаимное расположение электродов обеспечивает отсутствие электрического пробоя между электродами $E1$ и $E3$, однако при

подаче высокого потенциала на электрод $E1$ напряжение на $E3$ все еще может возрасти до значения в несколько сотен вольт, что может вывести из строя низковольтную часть установки, предназначенной для электролиза. Для того, чтобы этого избежать, эта часть схемы гальванически развязана от объема жидкости с помощью импульсного трансформатора T . Возбуждение первичной обмотки трансформатора T осуществляется с помощью программируемого цифрового генератора (DPG), у которого реализована возможность регулирования амплитуды генерируемых импульсов. Генератор работал в режиме генерации импульсов высокой частоты со скважностью, близкой к 0,5, в количестве n импульсов и с пропусками импульсов в количестве m . Перед подачей высокого напряжения в рабочую емкость экспериментально подбирались числа n , m , амплитуда импульсов, чтобы добиться требуемой частоты создания пузырьков, их размера. Полярность электрода $E3$ была положительная.

Для визуализации процесса и для определения пути следования электрической дуги использовался теневой метод, реализованный с применением светодиода L , скоростной видеокамеры V с микроскопом в качестве объектива, обеспечивающего пространственное разрешение 10 мкм/пиксель. Свет, излучаемый светодиодом коллимировался собирающей линзой в область между электродами $E1$ и $E2$, затем попадал в микроскоп видеокамеры. Регистрация теневой картины процесса началась после нажатия кнопки видеокамеры, а ее скорость записи составляла 140 000 к/с, экспозиция 0,3 мкс. Момент нажатия кнопки определялся оператором: когда в области между электродами $E1$ и $E2$ было достаточное количество пузырьков подходящего размера.

Для регистрации электрических параметров процесса использовались четырехканальный цифровой запоминающий осциллограф O (2 ГГц, 10 ГВыборок/с), высоковольтный пробник P , подключенный к высоковольтному электроду P , резистивный шунт R_s сопротивлением 25 Ом. Сигнал запуска видеокамеры одновременно подавался на осциллограф и на ключ S , которые обеспечивали начало их работы. На другой канал осциллографа дополнительно подавались сигналы начала экспозиции видеокамеры для того,

чтобы соотнести видимую картину разряда с электрическими параметрами цепи в это время. На остальные два канала осциллографа подавались сигналы пробника P и напряжение на шунте R_s для измерения напряжения на высоковольтном электроде $E1$ и тока в цепи, соответственно.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования производился поиск режима электролиза, который обеспечивал бы стабильное образование и отрыв пузырьков. На рисунке 2 представлена фотография цепочки пузырьков с диаметром около 50 мкм, количество пузырьков в видимой области равно 11. Пространственный период следования около 300 мкм.

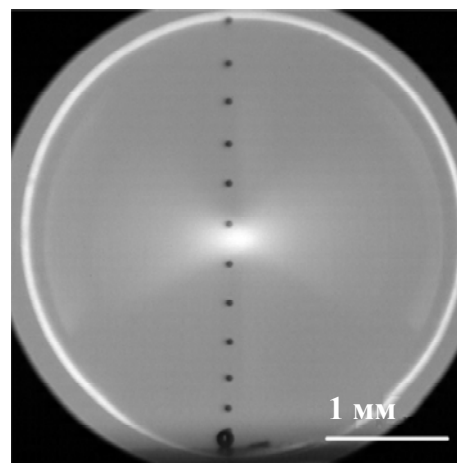


Рис. 2. Пример цепочки пузырьков, генерируемой с помощью электролиза в импульсно-периодическом режиме

Данный режим можно считать наилучшим, т. к. сочетает в себе относительно большой диаметр и отсутствие дополнительных паразитных центров образования пузырьков. Основная сложность достижения рабочего режима состоит в удовлетворении двум противоположно направленным требованиям: с одной стороны, для генерации пузырьков с размером в доли миллиметра и их цепочек необходимо увеличение тока, а с другой стороны – увеличение тока приводит к спонтанному появлению дополнительных центров генерации пузырьков на поверхности электрода $E3$, которые порождают дополнительные цепочки пузырьков меньшего диаметра (около 10 мкм). При этом постоянное протекание тока

даже небольшой амплитуды приводит к хаотичной генерации и отрыву пузырьков. Для того, чтобы преодолеть описанные трудности в работе вводится импульсно периодический режим напряжения на электроде $E3$. Предложенная форма напряжения – n импульсов с длительностью около 500 нс и периодом около 1 мкс, за которыми следует m импульсов-пропусков (напряжение равно нулю) – решает поставленную задачу. Высокая частота (около 1 МГц) в паре со скважностью около 50 % обеспечивают, по-видимому, импульсный режим образования газа, при котором каждая новая его порция успевает объединиться с растущим пузырем. Увеличение скважности снижает интенсивность газообразования, что приводит к большим периодам отрыва пузырей и большим расстояниям между соседними пузырьками в образующейся цепочке. Уменьшение скважности – напротив, приводит к появлению дополнительных центров газообразования и формированию нежелательных боковых цепочек. В предложенном способе отрыв пузырьков после их роста определяется наличием m импульсов-пропусков в сигнале напряжения. Ключевым, по-видимому, здесь оказывается влияние течений, возникающих под действием электрического поля вблизи поверхности электрода $E3$. Данное течение хорошо заметно глазу при наблюдении за мелкими пузырьками, оставшимися вблизи электрода после завершения предшествующего эксперимента. Подача новой серии импульсов приводит к тому, что на поверхности электрода формируется пузырек, а жидкость вокруг них устремляется к электроду, смывая тем самым пузырек с поверхности и обеспечивая его отрыв. Это обстоятельство является положительным и важным, т. к. в отсутствие вынуждающей силы отрыв пузырька от поверхности и преодоление сил поверхностного натяжения за счет сил плаву-

чести происходит при значительно больших диаметрах (порядка 1 мм). Суммарное время импульсов ($n + m$) по порядку величины совпадает с периодом отрыва пузырьков от поверхности, что позволяет предположить основную роль описанного выше механизма в отрыве пузырьков от электрода.

Следует отметить, что, несмотря на обнаруженные параметры управления процессом образования пузырьков, добиться цепочек пузырьков с диаметром порядка 1 мм на сегодняшний день не удастся. Быстрый рост крупных пузырьков при увеличении напряжения сопровождается появлением побочных центров газообразования и боковых цепочек мелких пузырьков. Медленный же рост крупных пузырей возможен, однако большое время роста приводит к очень большим расстояниям между пузырьками, при которых они уже не являются цепочкой и не могут служить для целей исследования их взаимного влияния при развитии электрического пробоя.

Несмотря на довольно высокую стабильность генерации цепочки пузырьков, часто наблюдается параллельный рост одного более крупного пузырька (см. рис. 2, на поверхности электрода), который в течение 5–10 секунд растет, а затем отрывается. Способов борьбы с этим эффектом пока не найдено, и это ограничивает сверху расстояние, на котором может размещаться высоковольтный электрод, т. к. после отрыва большой пузырь всплывает с большей скоростью и нарушает структуру цепочки, полученной до его отрыва. В текущей реализации это расстояние оказалось меньше, чем высота размещения высоковольтного электрода, выбранная из соображений безопасности низковольтной (электролизной) части электрической схемы. По этой причине цепочка пузырьков, по которой развивается электрический разряд (рис. 3), оказывается деформированной.

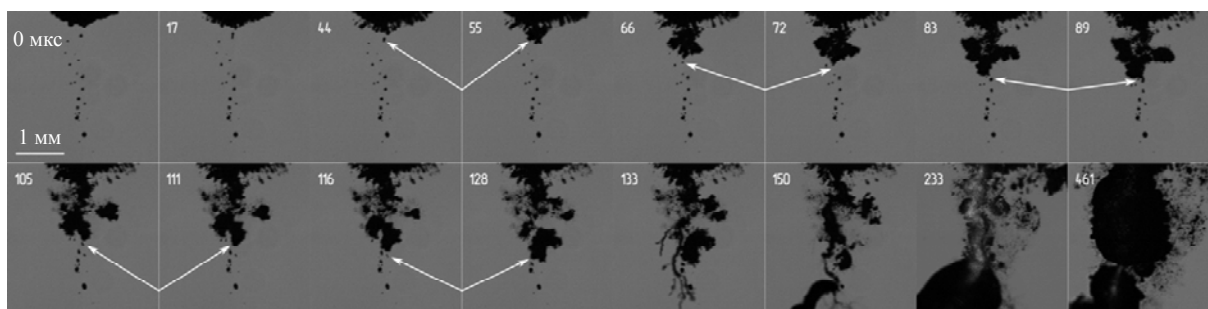


Рис. 3. Кинограммы развития электрического разряда в воде, направляемого цепочкой пузырьков

На рисунке 3 представлена кинограмма развития импульсного электрического разряда в воде с электропроводностью 45 мкСм/см в присутствии фрагмента цепочки пузырьков. Величина приложенного напряжения 10 кВ. У верхней границы рисунка видна небольшая часть скругленного анода, основная часть видимой области занята цепочкой пузырьков, катод находится за пределами снимка, под нижней границей. Соответствующие осциллограммы напряжения и тока на разрядном промежутке представлены на рисунке 4. Сразу после подачи напряжения начинается деформация электролизных пузырьков, прилипших к поверхности высоковольтного электрода $E1$ при всплытии. Размер вдоль поля увеличивается, поперек поля — уменьшается. Затем внутри одного из них происходит инициирование разрядного канала (44 мкс), который начинает прорасти вниз по направлению к заземленному электроду $E2$. Сравнивая последовательные кадры кинограммы (44 и 55 мкс, 66 и 72 мкс, и т. д.), с высокой долей уверенности можно говорить о вовлечении пузырьков цепочки (отмеченных стрелками) в процесс продвижения разрядного канала. К моменту времени 133 мкс канал оказывается достаточно близко к области неоднородного поля, связанного с наличием кромки центрального отверстия в электроде $E2$, и относительно медленный рост сменяется кратковременным и быстрым удлинением канала. На осциллограммах это сопровождается кратковременным всплеском тока до 0,5 А и провалом напряжения до 4 кВ. Окончательное замыкание промежутка происходит к 233 мкс и разряд переходит в дуговую стадию с током около 1,5 А, после чего высоковольтный ключ размыкается по истечении времени длительности импульса 500 мкс.

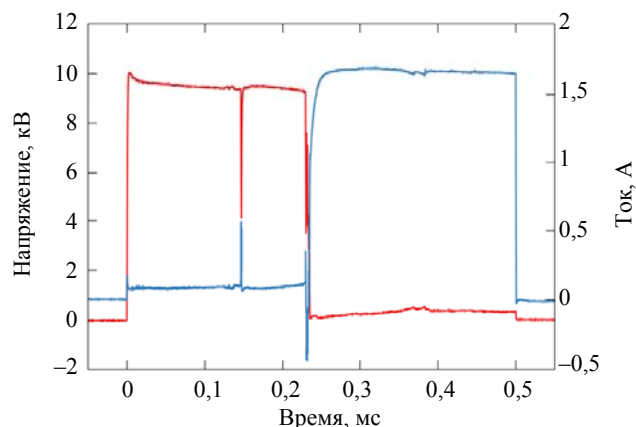


Рис. 4. Осциллограммы напряжения и тока на разрядном промежутке, соответствующие пробою на рис. 3

Выводы

Предложенный способ получения цепочек одиночных пузырьков субмиллиметрового диаметра с помощью импульсно-периодического электролиза в воде показал свою пригодность и перспективность в задачах исследования развития электрического разряда в двухфазных средах. К преимуществам относятся хорошая повторяемость диаметра пузырьков в цепочке и расстояния между соседними пузырьками, возможность влияния на эти величины через электрические параметры процесса электролиза и устанавливать их требуемое соотношение.

К недостаткам следует отнести сложность настройки и сильное влияние разряда на процесс электролиза при низкой электропроводности воды (около 5 мкСм/см) — после каждой подачи высокого напряжения процесс электролиза прекращается на некоторое время (минуты), что объясняется дефицитом ионов после протекания разрядного тока. Увеличе-

ние диаметра пузырьков затруднительно при сохранении периода их следования в цепочке, т. к. интенсификация процесса газообразования приводит к появлению нескольких центров роста, каждый из которых может начать генерировать собственную цепочку мелких пузырьков вместо генерации одного большого пузырька. Следствием неустойчивости процесса при большей производительности является периодическое появление и отрыв более крупных пузырьков, движение которых нарушает структуру цепочки. По этой причине инициирование разрядного процесса на больших расстояниях от точки генерации в хорошо структурированной цепочке пока затруднительно.

В наиболее успешной текущей постановке разряд был инициирован по цепочке из пузырьков диаметром 50–100 мкм с периодом следования около 200 мкм. Зафиксировано следование головной части разрядного канала за распределением пузырьков в межэлектродном промежутке.

Дальнейшие исследования будут направлены на устранение вышеперечисленных недостатков и визуализацию ионизационных процессов внутри пузырьков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков В. Я., Климкин В. Ф., Коробейников С. М., Лопатин В. В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005.
2. Starikovskiy A., Yang Y., Cho Y. I., Fridman A. / *Plasma Sources Sci. Technol.* 2011. Vol. 20. № 2. P. 024003.
3. Liu Q., Wang Z. D. / *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2015. Vol. 22. № 6. P. 3228–3236.

4. Naidis G. V. / *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016. Vol. 49. № 23. P. 235208.
5. Tereshonok D. V., Babaeva N. Yu., Naidis G. V., Smirnov B. M. / *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016. Vol. 49. № 50. P. 505501.
6. Tereshonok D. V., Babaeva N. Yu., Naidis G. V., Panov V. A., Smirnov B. M., Son E. E. / *Plasma Sources Sci. Technol.* 2018. Vol. 27. № 4. P. 045005.
7. Marinov I., Guaitella O., Rousseau A., Starikovskaia S. M. / *Plasma Sources Sci. Technol.* 2013. Vol. 22. № 4. P. 042001.
8. Shneider M. N., Pekker M. / *Phys. Rev. E.* 2013. Vol. 87. № 4. P. 043004.
9. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Son E. E. / *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016. Vol. 49. № 38. P. 385202.
10. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Son E. E. / *Plasma Sources Sci. Technol.* 2019. Vol. 28. № 8. P. 085019.
11. Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Куликов Ю. М., Савельев А. С., Филаткин А. А. / *Прикладная физика.* 2022. № 6. С. 29–34.
12. Babaeva N. Yu., Kushner M. J. / *Plasma Sources Sci. Technol.* 2009. Vol. 18. № 3. P. 035010.
13. Babaeva N. Yu., Tereshonok D. V., Naidis G. V. / *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2015. Vol. 48. № 35. P. 355201.
14. Бабаева Н. Ю., Бери Р. С., Хайдус Г. В., Смирнов Б. М., Сон Э. Е., Терешонок Д. В. / *Теплофизика высоких температур.* 2016. Т. 54. № 5. С. 792–816.
15. Babaeva N. Yu., Naidis G. V., Tereshonok D. V., Smirnov B. M. / *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017. Vol. 50. № 36. P. 364001.
16. Коробейников С. М., Мелехов А. В., Бесов А. С. / *Теплофизика высоких температур.* 2002. Т. 40. № 5. С. 706–713.
17. Sommers B. S., Foster J. E., Babaeva N. Yu., Kushner M. J. / *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. Vol. 44. № 8. P. 082001.
18. Hamdan A., Cha M. S. / *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2016. Vol. 44. № 12. P. 2988–2994.
19. Wang K., Bhuiyan S. I., Baky M. A. H., Kraus J., Campbell C., Tang X., Jemison H., Staack D. / *Plasma Sources Sci. Technol.* 2021. Vol. 30. № 5. P. 055013.
20. Sommers B. S., Foster J. E. / *Plasma Sources Sci. Technol.* 2014. Vol. 23. № 1. P. 015020.

PACS: 52.80.Wq

Gas bubbles chain in water and development of pulse electric discharge

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 23.04.2026; revised 20.05.2026; accepted 06.08.2026

The development of an electric discharge in a liquid in the presence of a distributed gas phase can proceed differently than in a single-phase medium due to faster ionization processes in the

gas. It was studied broadly in the numerical experiments by N. Yu. Babaeva and G. V. Naidis. They studied ionization within periodically distributed bubbles – two-dimensional arrays and one-dimensional chains. It was found the increase of electric field at the poles leads to increasing number of bubbles involved in the discharge development and it leads to expansion of the ionization region. However, numerical observation of a single discharge channel emerged from such ionized bubbles is currently impossible due to the multi-scale nature of the processes involved in the calculations. This work proposes a new method for generating ordered chains of gas bubbles in water. It is based on pulsed water electrolysis. Finally, effect of bubbles chain on the development of an electric discharge is examined.

Keywords: electrolysis, bubbles, chains, water, electric discharge.

REFERENCES

1. Ushakov V. Ya., Klimkin V. F., Korobeinikov S. M., and Lopatin V. V. Breakdown of Liquids at pulse Voltage. NTL, Tomsk, 2005 [in Russian].
2. Starikovskiy A., Yang Y., Cho Y. I., and Fridman A., Plasma Sources Sci. Technol. **20** (2), 024003 (2011).
3. Liu Q. and Wang Z. D., IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. **22** (6), 3228–3236 (2015).
4. Naidis G. V., J. Phys. D: Appl. Phys. **49** (23), 235208 (2016).
5. Tereshonok D. V., Babaeva N. Yu., Naidis G. V., and Smirnov B. M., J. Phys. D: Appl. Phys. **49** (50), 505501 (2016).
6. Tereshonok D. V., Babaeva N. Yu., Naidis G. V., Panov V. A., Smirnov B. M., and Son E. E., Plasma Sources Sci. Technol. **27** (4), 045005 (2018).
7. Marinov I., Guaitella O., Rousseau A., and Starikovskaia S. M., Plasma Sources Sci. Technol. **22** (4), 042001 (2013).
8. Shneider M. N. and Pekker M., Phys. Rev. E **87** (4), 043004 (2013).
9. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., and Son E. E., J. Phys. D: Appl. Phys. **49** (38), 385202 (2016).
10. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., and Son E. E., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (8), 085019 (2019).
11. Panov V. A., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Kulikov Yu. M., Saveliev A. S., and Filatkin A. A., Applied Physics 6 № 6, 29–34 (2022) [in Russian].
12. Babaeva N. Yu. and Kushner M. J., Plasma Sources Sci. Technol. **18** (3), 035010 (2009).
13. Babaeva N. Yu., Tereshonok D. V., and Naidis G. V., J. Phys. D: Appl. Phys. **48** (35), 355201 (2015).
14. Babaeva N. Yu., Berry R. S., Naidis G. V., Smirnov B. M., Son E. E., and Tereshonok D. V., High Temp. **54** (5), 745–766 (2016).
15. Babaeva N. Yu., Naidis G. V., Tereshonok D. V., and Smirnov B. M., J. Phys. D: Appl. Phys. **50** (36), 364001 (2017).
16. Korobeinikov S. M., Melekhov A. V., and Besov A. S., High Temp. **40** (5), 652–659 (2002).
17. Sommers B. S., Foster J. E., Babaeva N. Yu., and Kushner M. J., J. Phys. D: Appl. Phys. **44** (8), 082001 (2011).
18. Hamdan A. and Cha M. S., IEEE Trans. Plasma Sci. **44** (12), 2988–2994 (2016).
19. Wang K., Bhuiyan S. I., Baky M. A. H., Kraus J., Campbell C., Tang X., Jemison H., and Staack D., Plasma Sources Sci. Technol. **30** (5), 055013 (2021).
20. Sommers B. S. and Foster J. E., Plasma Sources Sci. Technol. **23** (1), 015020 (2014).

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