

УДК 532.5, 537.39
EDN: DUFCPP

PACS: 68.03.Hj

Эффект глубины погружения электрода на развитие предпробойных течений в дистиллированной воде*В. А. Панов, А. С. Савельев, Ю. М. Куликов*

Проведено экспериментальное и численное исследование поля скорости в дистиллированной воде, возникающего на допробойном этапе при подаче импульса напряжения на электрод-иглу при различной глубине её погружения. Полученные результаты анализируются в терминах экстремума (максимума) скорости течения, достигающегося в области наблюдения в непосредственной близости к высоковольтному электроду. Получено удовлетворительное согласие экспериментальной и численной зависимостей экстремума скорости от времени с расчетом. Показано, что максимальное значение скорости в возникающем течении достигается на более поздних временах с увеличением глубины погружения. Уменьшение глубины погружения приводит к возникновению электрического разряда при потере контакта высоковольтного электрода с водой из-за возникающего вблизи него течения. Выполненные исследования показывают дальнейшее направление развития построенной физико-математической модели.

Ключевые слова: жидкость; электрический пробой; ЭГД течения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-31-37

Введение

Взаимодействие жидкости с плазмой, образующейся в результате электрического разряда, является перспективным направлением исследований как с фундаментальной точки зрения, так и для многочисленных практических применений, в частности, для нанесения функциональных покрытий [1, 2], обработки поверхности изделий [3, 4], получения наночастиц и мелкодисперсных порошков [5, 6], плазменных реакторов [7, 8], системах очистки [9].

Во многих работах основной плазмообразующей средой является однопроцентный раствор хлорида натрия в воде. В частности, в [10, 11] исследовались параметры плазмы ВЧ-разряда (частотой $f = 13,56$ МГц) между струйным электролитическим и металлическим электродами: химический состав (в том числе концентрация электронов), термодинамические свойства (вращательная и колебательная температура гидроксильных радикалов). Для подобного же электролита в [12] проведены экспериментальные исследования разряда с жидким электролитным катодом в диапазоне токов 50–100 мА при межэлектродном расстоянии в пределах 3–4 мм. Зафиксировано возникновение пульсаций тока, которые исследованы в предположении капельного переноса вещества и зарядов из водного раствора в плазму разряда. На основе анализа осциллограмм тока оценены размеры образующихся капель. Влияние пузырьковой структуры на характер пульсаций тока и напряжения разряда было изучено в [13]. Представлены результаты экспериментальных исследо-

Панов Владислав Александрович, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: panovvladislav@gmail.com

Савельев Андрей Сергеевич, с.н.с., к.ф.-м.н.**Куликов Юрий Матвеевич**, с.н.с., к.ф.-м.н.Объединенный институт высоких температур РАН,
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 20.12.2024

После доработки 20.01.2025

Принята к публикации 27.01.2025

Шифр научной специальности: 1.3.13

© Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М., 2025

ваний электрического разряда переменного тока промышленной частоты в газожидкостной среде электролита с пузырьками для межэлектродных расстояний 50–150 мм внутри диэлектрической трубки. На основе анализа экспериментальных данных авторами был предложен механизм развития электрического разряда переменного тока в среде с микропузырьками.

Экспериментальные исследования разряда переменного тока [14] промышленной частоты в газожидкостной среде позволили установить качественный механизм развития пробоя и разряда при пониженных давлениях. Выявлено, что с понижением давления образуется газожидкостная среда, насыщенная мелкими пузырьками газа размером от 1 до 3 мм в результате кипения и электролиза. Это, в свою очередь, приводит к пробоям и быстрому зажиганию разряда в пористой среде около твердого электрода. Установлен переход электрического разряда с микроразрядами в объемный разряд при пониженных давлениях.

В работе [15] предложен физический механизм возникновения кольцевых и полукольцевых плазменных структур вокруг струи электролита в высокочастотном разряде с жидкими струйными электродами. Показано, что напряженность электрического поля в области распада струйного течения может достигать значений 1–10 МВ/м, при которых возможна автоэлектронная эмиссия, ведущая к появлению в окрестности струи первичных электронов, что приводит к ионизации и возбуждению молекул окружающей газовой среды.

В [16] определено, что действие тлеющего разряда атмосферного давления на воду вызывает образование гидратированных электронов, скорость генерации которых возрастает с увеличением тока разряда, в то время как энергетический выход остается постоянным и составляет $0,13 \pm 0,01$ частиц/100 эВ. С использованием метода акцепторов найдены скорости генерации и энергетические выходы гидратированных электронов в воде под воздействием тлеющего разряда атмосферного давления.

В [17, 18] измерены электрические и спектральные характеристики разряда с жидким электролитным катодом при атмосферном давлении в воздухе в диапазоне токов 20–90 мА. Найдены зависимости напряженности

поля от величины разрядного тока для водных растворов с разным составом и с разными значениями pH, но с одной и той же удельной электропроводностью 300 мкСм/см. Установлено, что измеренная интенсивность свечения второй положительной системы азота вблизи поверхности раствора в разряде для растворов с разным составом, разным значением pH и электропроводностью уменьшается с ростом тока разряда в диапазоне токов от 20 до 100 мА. Вращательная и колебательная температуры, определённые по молекулярному азоту, оказываются для всех экспериментов одинаковыми, и составляют 2400 и 3800 К соответственно.

Анализ выполненных работ показывает, что основное внимание исследователей сосредоточено на электрофизических и спектральных характеристиках разрядов, в то время как допробойным электрогидродинамическим эффектам уделено гораздо меньше внимания. Развитие электрического пробоя возможно не только вследствие изменения физико-химических свойств неподвижной среды, в которой он развивается, но и в совокупности с явлениями её переноса и перераспределения в пространстве около электродов. Следствием такого явления могут оказаться аномально низкие значения пробойного напряжения [19, 20].

Целью настоящей работы является экспериментальное и численное исследование поля скорости в дистиллированной воде, возникающего при подаче импульса напряжения на электрод-иглу при различной глубине погружения. Полученные результаты анализируются в терминах экстремума (максимума) скорости течения, достигающегося в области наблюдения в непосредственной близости к высоковольтному электроду.

Экспериментальная установка

В настоящем исследовании использовалась экспериментальная установка, подробно описанная в [21, 22], поэтому здесь приведем только основные параметры. Металлический электрод цилиндрической формы диаметром $d = 0,85$ мм погружался на различную глубину в дистиллированную воду, находящуюся в оптически прозрачной емкости в форме куба с ребром 8 см. С помощью высоковольтной

схемы на электрод подавался импульс амплитудой 10 кВ, вызывающий протекание тока по воде, с фронтом нарастания порядка 100 нс и длительностью менее 1 мс. Это вызывало формирование нестационарного течения жидкости вблизи поверхности электрода. С помощью метода Particle Image Velocimetry (PIV) определялось распределение двух компонент вектора скорости этого течения в плоскости оси электрода. Измерения проведены для четырех величин глубины погружения h : $1d$, $2d$, $4d$, $8d$.

Численное моделирование

Численное моделирование данной задачи требует совместного решения уравнений, принадлежащие к разным разделам физики. Это обстоятельство предъявляет дополнительные требования к проведению расчетов, а именно: использование малого шага по времени, расщепление по физическим процессам, применение итерационных решателей (методов Ньютона с релаксацией). Для пространственной дискретизации использовался метод конечных элементов. Электростатические эффекты описывались с помощью уравнения для электрического потенциала:

$$\nabla \times \vec{D} = \rho_v, \quad \vec{E} = -\nabla V, \quad \vec{D} = \varepsilon E, \quad (1)$$

где ρ_v – объемная плотность электрических зарядов, \vec{D} – вектор электрической индукции, V – электрический потенциал, \vec{E} – напряженность электрического поля, ε – относительная диэлектрическая проницаемость. В рассматриваемой задаче помимо связанных зарядов присутствуют также и свободные (анионы и катионы воды, образовавшиеся в процессе равновесной электролитической диссоциации). Для расчета движения ионов решались уравнения для концентрации:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \times (\vec{j} + \vec{u}c_i) = 0, \quad (2)$$

$$\vec{J} = -D_i \nabla c_i - z_i u_{m,i} F c_i \nabla V, \quad (3)$$

c_i – концентрация определенного сорта частиц, \vec{j} – поток частиц, связанный с концен-

трационной диффузией ионов и их дрейфом в электрическом поле, \vec{u} – конвективный перенос в поток жидкости, D_i – коэффициент диффузии, z_i – заряд иона, F – число Фарадея. Распределение свободных и связанных зарядов определяют объемную силу \vec{F}_{es} , действующую на жидкость

$$\vec{F}_{es} = \nabla \times \mathbf{T} + \rho_v \vec{E}, \quad (4)$$

$$T_{ij} = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} \delta_{ij} + \varepsilon \varepsilon_0 E_i E_j \quad (5)$$

где \mathbf{T} – тензор напряжений Максвелла, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, δ_{ij} – символ тензора Кронекера.

Значение электростатической силы позволяет найти распределения скорости и давления на основе уравнений движения вязкой несжимаемой среды

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \times \nabla) \vec{u} = \nabla \times [-p \mathbf{I} + \mathbf{K}] + \vec{F}_{es} \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \times (\rho \vec{u}) = 0, \quad (7)$$

которые дополняются соотношениями для баротропной жидкости $\rho(p) = \frac{p}{c^2} + \rho_0$, тензора напряжений $\mathbf{K} = \mu (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \times \vec{u}) \mathbf{I}$.

Расщепление по физическим процессам приводит к следующему алгоритму расчета неизвестных на новом слое по времени: (1) – по известному электрическому полю и распределению зарядов находятся скорость и давление, (2) – рассчитывается концентрация положительных ионов, (3) – находится концентрация отрицательных ионов. По новому полю скорости и распределению свободных зарядов определяется новое распределение электрического поля (4).

Для итерирования по времени используется неявный метод со вторым порядком аппроксимации и переменным шагом. Для нахождения решения линеаризованной системы уравнений используется метод Ньютона. Для каждой группы неизвестных параметры

метода Ньютона настраиваются индивидуально для обеспечения ускоренной сходимости.

Результаты и обсуждение

Эксперименты и расчеты проведены при одинаковых значениях глубины погружения электрода ($h = 1d, 2d, 4d, 8d$).

На рисунке 1 представлена зависимость максимальной средней скорости в наблюдаемой области, нормированная на значение на поздних временах течения. Видно, что скорость, фиксируемая в эксперименте (кривые 1 и 3) на начальном интервале развития течения до 30 мкс, существенно превосходит значения, полученные в результате численного моделирования (кривые 2 и 4). Одной из причин различий может быть влияние подвижной межфазной границы (вода-воздух), в то время как в расчете поверхность раздела сред является фиксированной. Существенное расхождение в начальный момент времени, вероятно, может являться и следствием того, что метод PIV испытывает трудности измерения скорости в малой окрестности электрода из-за относительно небольшого числа частиц в этой области. При погружении электрода на глубину $h = d$ на времени более 256 мкс после начала токового импульса наблюдалось опускание уровня воды ниже электрода, что приводило к возникновению воздушного зазора между ними и искрового разряда, что существенно меняло картину течения вблизи электрода. Подобный эффект наблюдался и при больших значениях времени при погружении на глубину $h = 2-4d$. В связи с этим измерения во времени ограничены значением в 1 мс.

При увеличении глубины погружения до $h = 2d$ (см. рис. 1, кривые 3 и 4) наблюдается удовлетворительное согласие кривых на поздних временах расчета. Отличительной особенностью кривой (2) являются осцилляции скорости, что вызвано существованием крупномасштабных вихрей, распространяющихся вниз по расчетной области. Данные вихри являются одной из особенностей осесимметричной модели, т. к. в эксперименте при движении от стержня наблюдается трехмерная эволюция этих структур (приводящая к распаду вихрей на более мелкие).

На рисунке 2 представлена мгновенная картина течения воды вблизи электрода в мо-

мент времени 256 мкс. Ось $x = 0$ совпадает с осью электрода, а прямая $y = 46,5$ мм совпадает с его краем. Цветом показан модуль вектора скорости, нормированный на максимальную скорость течения, которая достигается на более поздних временах, а стрелками – направление движения жидкости. Видно, что течение в приэлектродной области у торца стержня является вихревым, причем, из-за наличия некоторого произвольного поля завихренности в жидкости, а также неоднородности распределения электрического потенциала в окрестности торца стержня оно является трехмерным.

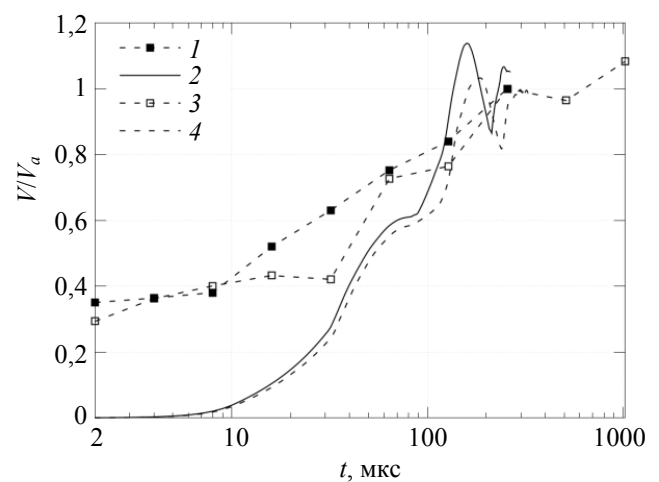


Рис. 1. Приведенная максимальная скорость течения при глубине погружения стержня $h = 1d$: эксперимент (1) и моделирование (2), и глубине $h = 2d$: эксперимент (3) и моделирование (4)

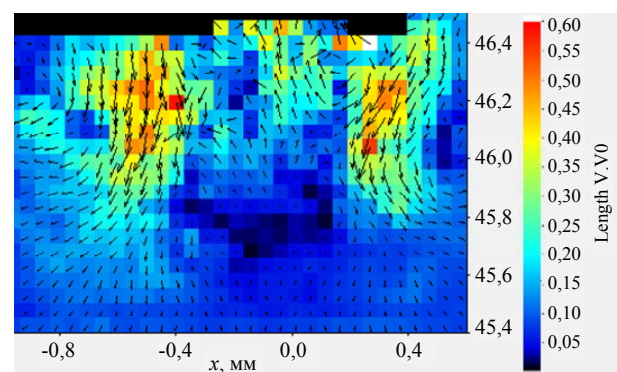


Рис. 2. Поле скорости вблизи поверхности иглы в момент времени 256 мкс после подачи токового импульса

Наилучшее совпадение результатов моделирования с экспериментом в окрестности $t = 100$ мкс наблюдается для случая $h = 4d$ (рис. 3), при этом аналогичным образом расчетная кривая приведенной скорости ис-

пытывает осцилляции. Для случая $h = 8d$ приведенная скорость, получаемая в расчете, превосходит экспериментальный результат.

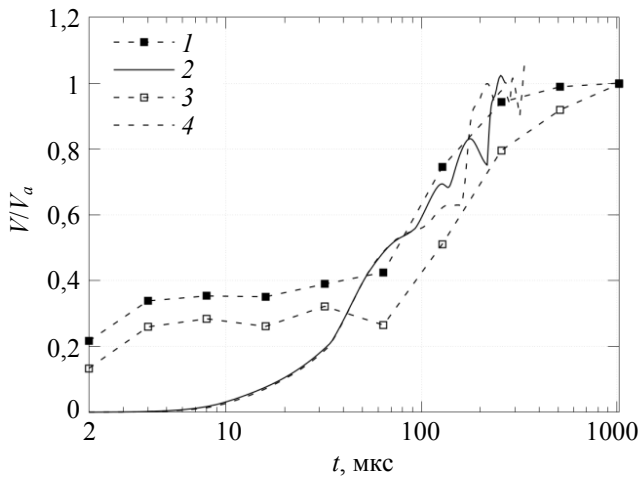


Рис. 3. Приведенная максимальная скорость течения при глубине погружения стержня $h = 4d$: эксперимент (1) и моделирование (2), и глубине $h = 8d$: эксперимент (3) и моделирование (4)

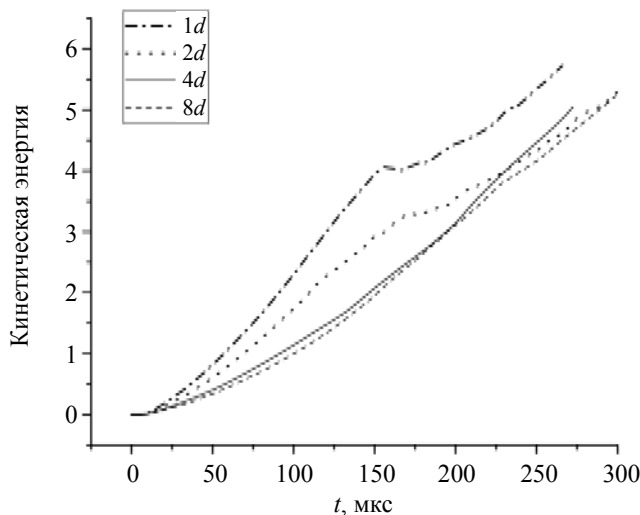


Рис. 4. Зависимость приведенной кинетической энергии течения от времени при различной глубине погружения стержня. Обработка результатов моделирования

Результаты эксперимента получены в окрестности электрода, что затрудняет введение интегральных величин, часто рассматриваемых в теории. Поэтому поведение кинетической энергии, одного из интегралов системы, рассматривается на основе результатов численного моделирования. На рисунке 4 представлены значения кинетической энергии, приведенные к значению для $h = 8d$ при $t = 100$ мкс (конец интервала регулярного поведения кривых). Видно, что увеличение глу-

бины погружения стержня приводит к уменьшению кинетической энергии системы. Объяснить это можно следующим образом. Малая глубина погружения приводит к большей концентрации электрического поля в окрестности кончика электрода, и, таким образом, к большей электростатической силе, действующей на элементарный объем жидкости, и, как следствие, к более быстрому набору скорости. При этом максимальное значение скорости в возникающем течении достигается на более поздних временах с увеличением глубины погружения.

Выводы

Важную роль в процессе движения горизонтальной межфазной границы в вертикальном электрическом играют возмущения в воде, распространяющиеся со звуковой скоростью при подаче напряжения. Данные возмущения деформируют поверхность раздела сред вода-воздух, что приводит к возникновению крупномасштабного течения, направленного снизу вверх вдоль стержня. Этот экспериментальный факт требует учета подвижности этой границы и эффектов поверхностного натяжения. Отдельного внимания требует двойной слой, формирующийся вокруг металлического электрода еще до подачи напряжения. Этот слой приводит к мелкомасштабной (порядка 100 нм) и весьма сильной (40–45 раз) неоднородности диэлектрической проницаемости воды, что налагает дополнительные требования к сеточному разрешению приэлектродной зоны. Подача напряжения на электрод приводит к разделению зарядов в приэлектродной области и её депротонизации, а также активизирует ряд нелинейных эффектов в областях особо сильного электрического поля на острых краях электрода, свойственных полярным жидкостям в целом и воде в частности, неравновесную электролитическую диссоциацию воды и нелинейный транспорт протонов. Кроме этого, большую сложность вызывает учет попадания атомов и микроскопических фрагментов электрода в приэлектродные слои жидкости.

Предложенная в работе модель является существенно нелинейной как в пространстве (в приэлектродном слое), так и во времени и

образует систему с положительной обратной связью: подача высоковольтного потенциала на электрод-иглу приводит к увеличению концентрации ионов (на несколько порядков за время расчета) и усилению экранировки. Экранировка, в свою очередь, приводит к росту электрического поля и его градиентов, и, в конечном итоге, к увеличению амплитуды объемной силы, действующей на жидкость. Однако, для того, чтобы разорвать эту связь, а также учесть распространение возмущений по границе, целесообразна дальнейшая разработка специальной «приэлектродной» модели сжимаемой сплошной среды, корректно учитывающей различные перечисленные нелинейности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Paulmier T., Bell J. M., Fredericks P. M. / *Thin Solid Films*. 2007. Vol. 515. P. 2926.
2. Quan C., He Y. / *Surf. Coat.* 2015. Vol. 269. P. 319.
3. Meletis E. I., Nie X., Wang F. L., Jiang J. C. / *Surf. Coat. Technol.* 2002. Vol. 150. P. 246.
4. Ishijima T., Nosaka K., Tanaka Y., Uesugi Y., Goto Y., Horibe H. / *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 103. P. 142101.
5. Wüthrich R., Allagui A. / *Electrochim. Acta*. 2010. Vol. 55. P. 8189.
6. Abdul K. T., Kaliani A. / *Ionics*. 2012. Vol. 18. P. 315.
7. Becker K. H., Schoenbach K. H., Eden J. G. / *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2006. Vol. 39. P. R55.
8. Gao S. Z., Ma D., Lu Q., Li Y., Li X., Yang W. / *Plasma Chem. Plasma Process.* 2010. Vol. 30. P. 873.
9. Son E. E., Sadriev R. Sh., Gaisin A. F., Bagautdinova L. N., Gaisin F. M., Shakirova E. F., Akhatov M. F., Gaisin Az. F., Kayumov R. R. / *High Temperature*. 2014. Vol. 52. P. 939.
10. Гайсин А. Ф., Гайсин Ф. М., Желтухин В. С., Сон Э. Е. / *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. № 1. С. 71.
11. Kayumov R. R., Kuputdinova A. I., Mirkhanov D. N. et al. / *Plasma Phys. Rep.* 2024. Vol. 50. P. 115.
12. Тазмеев Г. Х., Тазмеев А. Х., Тазмеев Х. К. / *Прикладная физика*. 2023. № 3. С. 33.
13. Валиев Р. И., Хафизов А. А., Багаутдинова Л. Н., Гайсин Ф. М., Басыров Р. Ш., Гайсин Аз. Ф., Гайсин Ал. Ф. / *Теплофизика высоких температур*. 2021. Т. 59. № 4. С. 634.
14. Хафизов А. А., Валиев Р. И., Багаутдинова Л. Н., Гайсин Аз. Ф., Гайсин Ал. Ф., Гайсин Ф. М., Сон Э. Е., Фахрутдинова И. Т. / *Теплофизика высоких температур*. 2022. Т. 60. № 4. С. 625–628.
15. Желтухин В. С., Гайсин Ал. Ф., Петряков С. Ю. / *Письма в ЖТФ*. 2022. Т. 48. № 17. С. 24.
16. Хлюстова А. В., Тутов В. А. / *Прикладная физика*. 2015. № 6. С. 48.
17. Чистолинов А. В., Тюфтяев А. С., Гаджиев М. Х. / *Прикладная физика*. 2021. № 5. С. 5.
18. Чистолинов А. В., Якушин Р. В., Перфильева А. В. / *Прикладная физика*. 2022. № 1. С. 12.
19. Панов В. А., Куликов Ю. М., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Савельев А. С. / *Прикладная физика*. 2023. № 6. С. 5.
20. Panov V. A., Kulikov Yu. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. / *Plasma Sources Sci. Technol.* 2023. Vol. 32. № 9. P. 095020.
21. Панов В. А., Савельев А. С., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Куликов Ю. М. / *Прикладная физика*. 2023. № 4. С. 87.
22. Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М. / *Прикладная физика*. 2024. № 4. С. 89.

PACS: 68.03.Hj

Effect of electrode immersion depth on the development of pre-breakdown flows in distilled water

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

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bld. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: panovvladislav@gmail.com

Received 20.12.2024; revised 20.01.2025; accepted 27.01.2025

An experimental and numerical study of the velocity field in distilled water occurring at the pre-breakdown stage when a voltage pulse is applied to the electrode-needle at different immersion depths is carried out. The results obtained are analyzed in terms of the extremum

(maximum) of the flow velocity achieved in the observation area in the immediate vicinity of the high-voltage electrode. Satisfactory agreement between the experimental and numerical dependences of the velocity extremum on time and the calculation is obtained. It is shown that the maximum value of the velocity in the emerging flow is achieved at later times with increasing immersion depth. A decrease in the immersion depth leads to the occurrence of an electric discharge when the high-voltage electrode loses contact with water due to the flow occurring near it. The studies performed show the further direction of development of the constructed physical and mathematical model.

Keywords: liquid; electrical breakdown; EHD flows.

REFERENCES

1. Paulmier T., Bell J. M. and Fredericks P. M., Thin Solid Films **515**, 2926 (2007).
2. Quan C. and He Y., Surf. Coat **269**, 319 (2015).
3. Meletis E. I., Nie X., Wang F. L. and Jiang J. C., Surf. Coat. Technol. **150**, 246 (2002).
4. Ishijima T., Nosaka K., Tanaka Y., Uesugi Y., Goto Y. and Horibe H., Appl. Phys. Lett. **103**, 142101 (2013). <https://doi.org/10.1063/1.4823530>
5. Wüthrich R. and Allagui A., Electrochim. Acta **55**, 8189 (2010).
6. Abdul K. T. and Kaliani A., Ionics **18**, 315 (2012).
7. Becker K. H., Schoenbach K. H. and Eden J. G., J. Phys. D: Appl. Phys. **39**, R55 (2006).
8. Gao S. Z., Ma D., Lu Q., Li Y., Li X. and Yang W., Plasma Chem. Plasma Process. **30**, 873 (2010).
9. Son E. E., Sadriev R. Sh., Gaisin A. F., Bagautdinova L. N., Gaisin F. M., Shakirova E. F., Akhatov M. F., Gaisin Az. F. and Kayumov R. R., High Temperature **52**, 939 (2014).
10. Gaisin A. F., Gaisin F. M., Zheltukhin V. S. et al., Plasma Phys. Rep. **48**, 48 (2022).
11. Kayumov R. R., Kuputdinova A. I., Mirkhanov D. N. et al., Plasma Phys. Rep. **50**, 115 (2024).
12. Tazmeev G. K., Tazmeev A. K. and Tazmeev K. K., Applied Physics, № 3, 33 (2023) [in Russian].
13. Valiev R. I., Khafizov A. A., Bagautdinova L. N. et al., High. Temp. **60**, Suppl. 1, 127–130 (2022).
14. Khafizov A. A., Valieva R. I., Bagautdinova L. N., Gaisin Az. F., Gaisin A. F., Gaisin F. M., Sond E. E. and Fakhrutdinova I. T., High Temp. **60** (4), 570 (2022).
15. Zheltukhin V. S., Gaisin A. F. and Petryakov S. Y., Technical Physics Letters, № 9, 22 (2022).
16. Khlyustova A. V. and Titov V. A., Applied Physics, № 6, 48 (2015) [in Russian].
17. Chistolinov A. V., Tyuftyaev A. S. and Gadzhiev M. Kh., Applied Physics, № 5, 5 (2021) [in Russian].
18. Chistolinov A. V., Yakushin R. V. and Perfilieva A. V., Applied Physics, № 1, 12 (2022).
19. Panov V. A., Kulikov Yu. M., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Saveliev A. S., Applied Physics, № 6, 5 (2023) [in Russian].
20. Panov V. A., Kulikov Yu. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya. and Vasilyak L. M., Plasma Sources Sci. Technol. **32** (9), 095020 (2023).
21. Panov V. A., Saveliev A. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Kulikov Yu. M., Journal of Communications Technology and Electronics **68**, Suppl. 2, 170–175 (2023).
22. Panov V. A., Saveliev A. S. and Kulikov Yu. M., Applied Physics, № 4, 89 (2024) [in Russian].