

УДК 532.5, 537.39  
EDN: NIFPZG

PACS: 68.03.Hj

## Допробойные течения в дистиллированной воде под действием микросекундных импульсов напряжения

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

*Методом Particle Image Velocimetry (PIV) с высокими пространственным и временным разрешениями исследовано формирование и эволюция течения в воде с проводимостью 5 мкСм/см вблизи электрода под действием импульса напряжения микросекундной длительности. Движение воды на ранних временах после подачи импульса (от 2 мкс) происходит от поверхности иглы. Тонкая струя у кромки цилиндра, направленная по диагонали от поверхности, появляется около 64 мкс. Вовлечение в нее жидкости из-под торца, приводит к развороту течения и формированию одного из нескольких сопутствующих струе вихрей. Результаты моделирования согласуются с наблюдаемой картиной течения и позволяют сделать выводы о распределении силы, действующей со стороны электрического поля, и результирующего давления в жидкости. Наличие области, в которой вектор силы меняет направление, приводит к смещению струи от своего первоначального направления в сторону под торец. Рассчитанные размеры и положение вихря с разумной точностью совпадают с зафиксированными в эксперименте.*

*Ключевые слова:* вода, слабый электролит, ЭГД-течения, PIV, моделирование.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-89-95

### Введение

Приложение достаточно сильного импульсного электрического поля к межэлектродному промежутку, заполненному жидкостью, может вызвать частичный разряд: стримерный или коронный [1] или пробой [2]. В отличие от разрядов в газе, столкновительная ионизация в жидкости вследствие прямой эмиссии с электродов маловероятна, поскольку из-за высокой частоты столкновений элект-

ронам становится сложнее набрать достаточную энергию. Коэффициент ионизации в жидкостях пренебрежимо мал для полей, при которых происходит пробой [3]. Принято считать, что он возникает в области низкой плотности, локализующейся вблизи электродов при подаче на них высокой разности потенциалов [4–6]. В этой области происходит электрический разряд, обладающий свойствами электронных лавин, наблюдаемых в газовых разрядах.

При контакте металла с сильным электролитом толщина двойного межфазного слоя может составлять менее 1 нм [7], а поскольку равновесная разность потенциалов может быть порядка 1 В, среднее электрическое поле может достигать  $10^9$  В/м. В таких условиях изменение межфазного натяжения попадает в диапазон (0,2–18) мН/м. Уменьшение межфазного натяжения на границе раздела электродов находится на уровне поверхностного натяжения для многих жидкостей. Например,

**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 10.06.2024

После доработки 28.06.2024

Принята к публикации 18.07.2024

Шифр научной специальности: 1.3.13

© Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М., 2024

поверхностное натяжение н-гексана составляет около 18 мН/м. Это означает, что сцепление жидкости с поверхностью электрода на кончике, где поле сильное, будет потеряно, и молекулы жидкости будут стремиться разойтись. Следовательно, вероятно образование полостей, первоначально в субмикроскопическом масштабе, что, возможно, приведет к развитию первичной полости. При приложении внешнего электрического поля она развивается в направлении линий напряженности. В результате электроны с «открытой» (несмоченной) поверхности жидкости могут легко переходить в жидкость с наружной поверхности каверны. Затем они образуют сильно локализованный отрицательный пространственный заряд, что приводит к существенному искажению электрического поля. Как следствие, второе поколение пустот будет выглядеть как кустообразное продолжение первичной каверны. Дальнейшее их распространение, вероятно, будет происходить за счет развития нитевидной каверны в жидкости и в конечном итоге приведет к пробую.

Одновременное моделирование двойных слоев (толщиной порядка нанометров) и движения жидкости в электрическом поле является сложной задачей, требующей построения сопряженной модели и значительных вычислительных мощностей. Однако, качественное представление о динамике приэлектродного слоя в рамках приближения сплошной среды можно получить, используя модель транспорта малых концентраций ионов.

Целью настоящей работы является экспериментальное и численное исследование течений дистиллированной воды, возникающих при подаче импульса напряжения на электрод-иглу. Ранее [8] были рассмотрены картины течений на поздних временах после воздействия импульса, где сформированное течение происходило уже по инерции. В данной работе применен метод PIV с высоким пространственным и временным разрешением, что позволило детально проследить эволюцию течения вблизи поверхности электрода. Для объяснения полученных данных была построена расчетно-теоретическая модель, включающая в себя сопряженный расчет распределения потенциала и скорости жидкости.

## Экспериментальная установка

Используется модифицированная экспериментальная установка из [8]. Отличие заключается в системе PIV, в состав которой вошел двойной Nd:YAG лазер с модуляцией добротности и генератором второй гармоники 532 нм, а также специальная оптика — объектив-микроскоп видеокамеры и оптика, формирующая тонкий лазерный нож. Лазерное излучение направляется на оптику, формирующую тонкий лазерный нож (толщина ~ 100 мкм), с помощью которого освещается область визуализации. Пространственное разрешение модифицированной системы составило 100 мкм. Высоковольтным электродом служит прежняя игла [8], заглушенная заподлицо с помощью проволоки подходящего диаметра (0,53 мм), радиус скругления наружной кромки иглы 20 мкм.

## Результаты и обсуждение

### Экспериментальные результаты

Эксперименты проведены для длительностей импульса 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 и 1024 мкс и глубины погружения иглы 1,7 мм (два диаметра). Напряжение на электроде 9 кВ, амплитуда токового импульса около от 30 до 40 мА. Проводимость воды 5 мкСм/см. Картины течений регистрировались в конце действия импульса. Таким образом была прослежена эволюция течения (рис. 1). На ранних временах течение происходит преимущественно от поверхности электрода. Такое поведение может быть связано со сжатием слоев жидкости, ближайших к поверхности электрода, в направлении «к электроду» на стадии фронта нарастания импульса [9] и последующей релаксацией в обратном направлении. Максимальная скорость возникающего течения нарастает со временем — от значений (1–2) м/с на временах до 100 мкс до (3–4) м/с от 100 до 1000 мкс. По мере развития течения его структура меняется, вблизи кромки начинает формироваться струя, направленная по диагонали от кромки вправо и вниз. При этом основное течение на оси под торцом еще направлено вниз, а в слоях глубиной 0,1–0,2 мм жидкость уже вовлекается в струю и

разворачивается в обратную сторону. Дальнейшее развитие выражается в увеличении скорости в формирующейся струе, происходит разворот течения под торцом на всё большей глубине – ко времени 256 мкс скорость и глубина проникновения струи составляют 3,7 м/с и 0,7 мм соответственно. Все больше жидкости разворачивается и вовлекается в струю со стороны боковой поверхности элект-

рода: максимальная скорость течения возрастает до 1,5 м/с, течение формируется вдоль этой поверхности и по диагонали справа сверху. На изображениях 256 и 1024 мкс видно, что струя загибается под электрод в сторону оси. Такое поведение может быть следствием пространственного распределения действующих сил, расчет и анализ которого был выполнен с помощью численного моделирования.

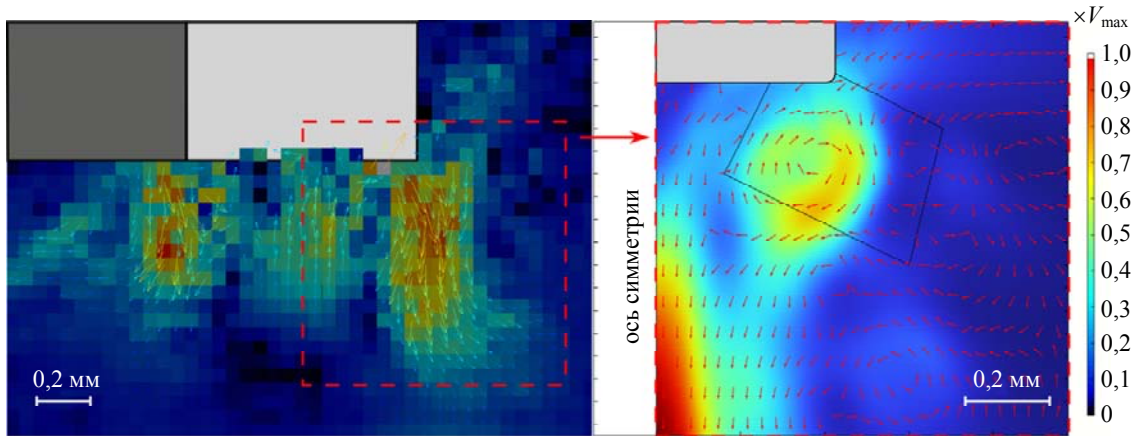


Рис. 1. Картины течения воды вблизи высоковольтного электрода-иглы в момент времени 256 мкс после подачи импульса напряжения, полученные с помощью PIV метода (слева) и в моделировании (справа). Цветом обозначена величина скорости, стрелками – направление течения. Светло-серым цветом обозначен электрод, темно-серым – область тени от электрода

### Результаты моделирования

Примененная модель включает в себя уравнение Навье-Стокса для сжимаемой среды, уравнение для распределения потенциала и зарядов, выражение для силы со стороны электрического поля, а также уравнения для транспорта ионов ( $H^+$  и  $OH^-$ ) в малых концентрациях:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \times \nabla) \vec{u} = \nabla \times [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \vec{F}_{es} \quad (1)$$

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

$$\rho(p) = \frac{p}{c^2} + \rho_0 \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \times \vec{u}) \mathbf{I} \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{D} = \rho_v \quad (5)$$

$$E = -\nabla V \quad (6)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \times (\vec{J} + \vec{u} c_i) = R_i \quad (7)$$

$$\vec{J} = -D_i \nabla c_i - z_i u_{m,i} F c_i \nabla V \quad (8)$$

$$\vec{F}_{es} = \nabla \times \mathbf{T} + \rho_v \vec{E} \quad (9)$$

$$T_{ij} = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} \delta_{ij} + \varepsilon \varepsilon_0 E_i E_j \quad (10)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $\vec{u}$  – вектор скорости,  $\mathbf{I}$  – единичная матрица,  $\mathbf{K}$  – тензор вязких напряжений,  $F_{es}$  – объемная сила со стороны электрического поля,  $p$  – давление,  $c$  – скорость распространения звука в среде,  $\rho_0$  – характерная плотность среды;  $\mu$  – динамическая вязкость,  $D$  – вектор электрической индукции,  $E$  – вектор напряженности электрического поля,  $V$  – электростатический потенциал,  $c_i$  – концентрация свободных зарядов сорта  $i$ ,  $R_i$  – источник свободных зарядов сорта  $i$ ,  $J$  – суммарный поток носителей заряда сорта  $i$ ,  $z_i$  – заряд иона,  $D_i$  – коэффициент диффузии час-

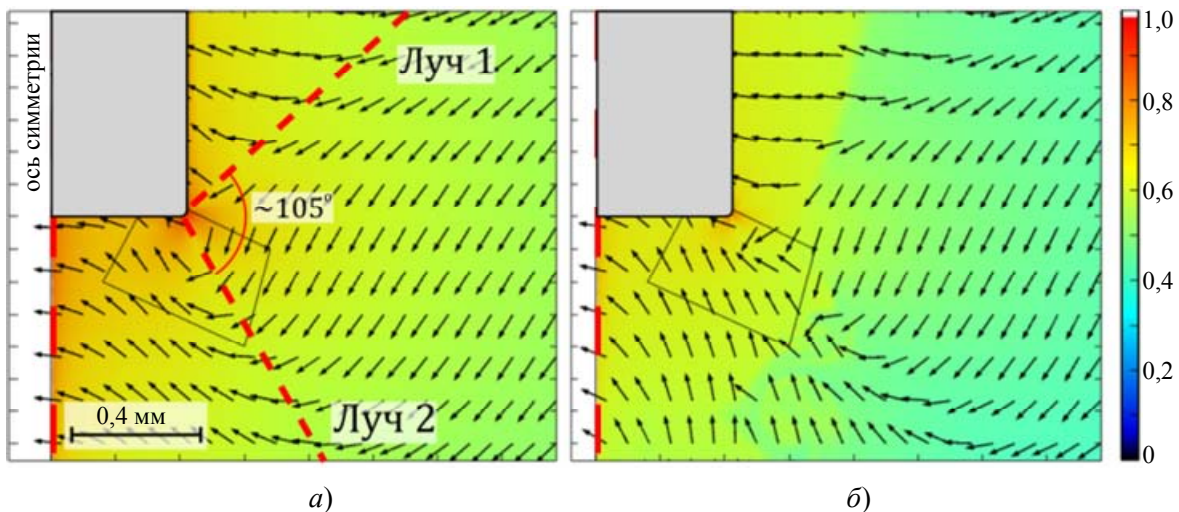
тиц сорта  $i$ ,  $\mathbf{T}$  – тензор напряжений Максвелла,  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $F$  – постоянная Фарадея,  $\delta_{ij}$  – тензор Кронекера,  $u_{m,i}$  – дрейфовая скорость частиц сорта  $i$ .

Построенная модель позволяет получить качественное совпадение с экспериментом на временах до 300 мкс. Результаты моделирования приведены для полей действующих сил, нормированной скорости и объемной концентрации  $\text{H}^+$ . Расчет проведен в осесимметричной постановке. Геометрические размеры расчетной области повторяют размеры реального эксперимента.

Пространственное распределение объемной силы является существенно неоднородным (рис. 2а). Наибольшие значения  $|F|$  сосредоточены в окрестности оси симметрии, а также у кромки. Радиус скругления определяет пространственную неоднородность поля и амплитуду вынуждающей силы. Из центра скругления исходят два «луча» с углом раскрытия  $105^\circ$  в окрестности которых  $|F|$  имеет локальный минимум – сила оказывается меньше на несколько порядков. С течением

времени, из-за увеличения концентрации свободных зарядов сила также увеличивается и на торце электрода. Векторное поле силы подчиняется общим закономерностям для диэлектриков и направлено в сторону высоковольтного потенциала что означает втягивание диэлектрика в область сильного электрического поля. Описанные выше лучи являются зонами резкого изменения направления векторного поля. Луч 1 (рис. 2а) отделяет части объема жидкости, стремящиеся к боковой поверхности, от частей, общее движение которых направлено к оси симметрии. Луч 2, направленный вниз, определяет поворот векторного поля к нижней поверхности электрода.

Подобное распределение является следствием формы электрода и определяет конвективный перенос жидкости на начальном этапе развития течения (до распада затопленной струи). На более поздних временах (рис. 2б) поле силы возмущается вихревыми движениями слоев жидкости с различной концентрацией анионов и катионов. Постоянное распределение наблюдается в слоях воды у поверхности электрода.



**Рис. 2.** Расчётное распределение объемной силы в начальный момент времени 11 мкс (слева) к 256 мкс (справа). Цветом обозначен десятичный логарифм модуля действующей силы, стрелками – направление действия. Минимум локализован за пределами отображаемой области. Шкала дана в долях от  $\log[\max(F_{es})]$ , равного 12 и 14 к 11 и 256 мкс соответственно

Область высокого давления на кромке электрода имеет значительную пространственную неоднородность (высокое значение градиента давления), что приводит к «выдавливанию» слоев жидкости в направлении, перпендикулярном поверхности скругления и к образованию высокоскоростной струи (рис. 3)

у кромки, которая в дальнейшем начинает отклоняться к оси симметрии в соответствии с направлением действия поперечной силы. Данная сила также приводит к образованию возвратного течения в направлении к торцу электрода. Что в совокупности со сдвиговой неустойчивостью приводит к разруше-



нию струи и образованию системы вихрей,двигающихся в направлении вниз от электрода.

Подача напряжения на электрод приводит к изменению распределения концентраций анионов и катионов: ионы  $H^+$  стремятся покинуть приэлектродную зону (рис. 4). Особенно быстро это происходит вблизи кромки электрода, как вследствие повышенной скорости дрейфа, так и из-за конвективного переноса в струе, что приводит к депротонизации приэлектродного слоя. В рассматриваемом случае происходит инжектирование депрото-

низованной воды из приэлектродного слоя в объем воды с равновесной концентрацией ионов. Процесс депротонизации также интенсивно происходит и у нижней поверхности электрода. На более поздних временах толщина слоя с относительно низкой концентрацией  $H^+$  достигает 0,5 мм, а в области ниже электрода вследствие низкой подвижности ионов образуются перемешанные слои «обычной» и депротонизованной воды. По той же причине эти слои постоянно деформируются вихрями, сходящими с края электрода.

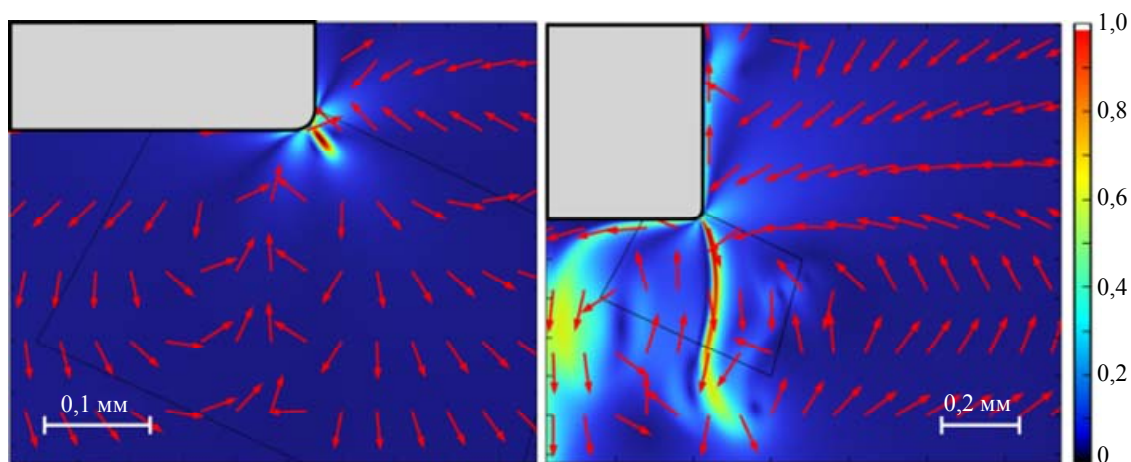


Рис. 3. Расчётное распределение скорости в начальный момент времени 11 мкс (слева) и к 110 мкс (справа). Цветом указано нормированное на максимум значение скорости, стрелками – направление течения

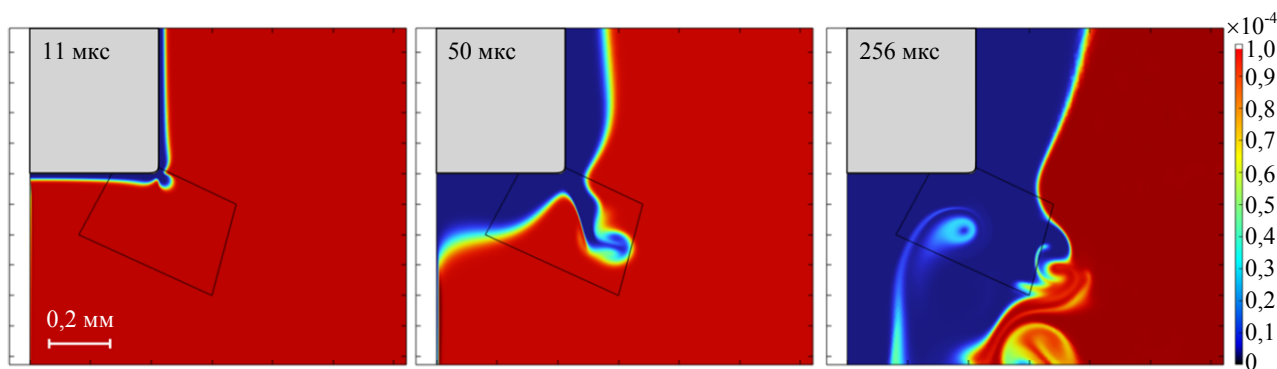


Рис. 4. Расчётное распределение концентрации  $H^+$  [моль/м<sup>3</sup>] в моменты времени 11 мкс, 50 мкс и 256 мкс

### Выводы

Исследовано развитие течения воды вблизи поверхности иглы под действием импульсного напряжения с помощью математического моделирования и экспериментально с помощью метода PIV с высоким пространственным разрешением.

Анализ результатов исследования показал, что на ранних временах после подачи им-

пульса (от 2 мкс) вода движется от поверхности иглы вниз в направлении заземленного электрода и в стороны. Увеличение скорости течения без его существенной перестройки происходит до 64 мкс, когда у кромки электрода выделяется относительно тонкая струя, направленная по диагонали от поверхности. Вовлечение в нее жидкости из-под торца, приводит к развороту течения и формированию одного из нескольких сопутствующих

струе вихрей. Результаты моделирования согласуются с наблюдаемой картиной течения и позволяют сделать выводы о распределении силы, действующей со стороны электрического поля, а также о результирующем давлении в жидкости. Наличие области, в которой вектор силы меняет направление, приводит к смещению струи от своего первоначального направления к оси стержня. Рассчитанные размеры и положение вихря с разумной точностью совпадают с зафиксированными в эксперименте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Singh B., Chadband W. G., Smith C. W., Calderwood J. H. / J. Phys. D: App. Phys. 1972. Vol. 5. № 8. P. 1457–1464.
2. Devins J. C., Rzad S. J., Schwabe R. J. / J. App. Phys. 1981. Vol. 52. № 7. P. 4531–4545.
3. Jones H. M., Kunhardt E. E. / J. Phys. D: App. Phys. 1995. Vol. 28. № 1. P. 178–188.
4. Lewis T. J., Llewellyn J. P., van der Sluijs M. J. / Proc. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP'94) Arlington, TX, USA, 1994. P. 328–333.
5. Sharbaugh A. H., Devins J. C., Rzad S. J. / IEEE Trans. Electr. Insul. 1978. Vol. EI-13. № 4. P. 249–276.
6. Sadeghzadeh-Araghi M., Qureshi M., Chadband W., Watson P. / IEEE Trans. Electr. Insul. 1991. Vol. 26. № 4. P. 663–672.
7. Xiao S. Electrical Breakdown in Polar Liquids, PhD Thesis. – USA, Norfolk, Old Dominion University, 2004.
8. Панов В. А., Савельев А. С., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Куликов Ю. М. / Прикладная физика. 2023. № 4. С. 87–94.
9. Tereshonok D. V., Babaeva N. Yu., Naidis G. V., Smirnov B. M. / J. Phys. D: App. Phys. 2016. Vol. 49. № 50. P. 505501.

PACS: 68.03.Hj

## Pre-breakdown flow in distilled water under the influence of microsecond voltage pulses

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 10.06.2024; revised 28.06.2024; accepted 18.07.2024

*Using the Particle Image Velocimetry (PIV) method with high spatial and temporal resolutions, the formation and evolution of flow in water with a conductivity of 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  near an electrode under the action of a voltage pulse of microsecond duration was studied. The movement of water at early times after the pulse is applied (from 2  $\mu\text{s}$ ) occurs from the surface of the needle. A thin jet at the edge of the cylinder, directed diagonally from the surface, appears at about 64  $\mu\text{s}$ . The involvement of liquid from under the end leads to a reversal of the flow and the formation of one of several vortices accompanying the jet. The simulation results are consistent with the observed flow pattern and allow us to draw conclusions about the distribution of the force acting from the electric field and the resulting pressure in the fluid. The presence of a region in which the force vector changes direction leads to a displacement of the jet from its original direction towards the end. The calculated dimensions and position of the vortex coincide with reasonable accuracy with those recorded in the experiment.*

*Keywords:* flooded jet, plasma torch, flow around a rod, erosion, diagnostics.

**REFERENCES**

1. Singh B., Chadband W. G., Smith C. W. and Calderwood J. H., *J. Phys. D: App. Phys.* **5** (8), 1457–1464 (1972).
2. Devins J. C., Rzed S. J. and Schwabe R. J., *J. App. Phys.* **52** (7), 4531–4545 (1981).
3. Jones H. M. and Kunhardt E. E., *J. Phys. D: App. Phys.* **28** (1), 178–188 (1995).
4. Lewis T. J., Llewellyn J. P. and van der Sluijs M. J. *Proc. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP'94) Arlington, TX, USA, 1994*, pp. 328–333.
5. Sharbaugh A. H., Devins J. C. and Rzed S. J., *IEEE Trans. Electr. Insul.* **EI-13** (4), 249–276 (1978).
6. Sadeghzadeh-Araghi M., Qureshi M., Chadband W. and Watson P., *IEEE Trans. Electr. Insul.* **26** (4), 663–672 (1991).
7. Xiao S. *Electrical Breakdown in Polar Liquids*, PhD Thesis. USA, Norfolk, Old Dominion University, 2004.
8. Panov V. A., Saveliev A. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Kulikov Yu. M., *Applied Physics*, № 4, 87–94 (2023) [in Russian].
9. Tereshonok D. V., Babaeva N. Yu., Naidis G. V. and Smirnov B. M., *J. Phys. D: App. Phys.* **49** (50), 505501 (2016).