

УДК 537.52
EDN: QJPRIK

PACS: 52.80.Wq

**Динамика межфазной границы в системе «вода–масло»
при электрическом пробое**

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

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия*** E-mail: panovvladislav@gmail.com**Статья поступила в редакцию 9.02.2026; после доработки 5.03.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.9*

В работе экспериментально и с помощью численного моделирования в осесимметричной трехмерной постановке рассмотрена задача формирования конической поверхности границы раздела «вода–трансформаторное масло» при подаче высоковольтного напряжения на электроды. Благодаря использованию электродов цилиндрической формы с заруглением торцов удалось провести более детальное численное моделирование, результаты которого хорошо согласуются с данными эксперимента. Показано, что для отслеживания границы следует использовать профили фазовой переменной и нормированной осевой скорости. Предложенный метод моделирования процесса может помочь проводить предварительную оценку устойчивости высоковольтного маслонаполненного оборудования к возникновению локальных электрических пробоев из-за возможного появления влажности.

Ключевые слова: проводящая вода, трансформаторное масло, импульсное электрическое поле, водяной конус, ЭГД-течения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-53-59

Введение

Влажность в масляной изоляции высоковольтного оборудования является критическим фактором риска, способствующим иницированию электрического пробоя, который может привести к катастрофическим последствиям. Особую опасность представляет наличие протяженной (по сравнению с зазорами в высоковольтном оборудовании) границы раздела фаз «вода–масло», поведение которой в импульсном электрическом поле до конца не изучены, а механизм электрического пробоя в таком случае требует детального изучения.

Наличие даже следовых количеств воды в трансформаторном масле резко снижает его диэлектрическую прочность. Это связано с тем, что вода, обладающая высокой диэлек-

трической проницаемостью ($\epsilon \sim 80$) относительно масла ($\epsilon \sim 2,2$) и электропроводностью, в неоднородном поле поляризуется, формируя проводящие мостики и локально усиливая величину его напряженности [1, 2]. Конденсация влаги на внутренних поверхностях бака или образование свободных водяных капель могут привести к локальным разрядам, иницирующим внутренний пробой и аварийную разгерметизацию активной части трансформатора.

В однородных диэлектрических жидкостях преобладают два классических механизма пробоя [3]. Стримерно-лидерный (лавинный) пробой обусловлен ударной ионизацией и развитием быстрых древовидных каналов (стримеров). Он характерен для импульсных воздействий (нано-/микросекунды) в сильных полях (>100 кВ/см) и хорошо изучен [3, 4]. Его динамика аналогична пробую в плотных

газах, где решающую роль играет эмиссия электронов с катода и образование газовых пузырьков за счет джоулева нагрева [3–12]. Тепловой пробой происходит в более слабых, но длительно действующих полях, где нагрев жидкости от токов утечки и проводимости превышает теплоотвод, приводя к тепловой неустойчивости и образованию проводящего канала.

Фактором, существенно усложняющим картину, является наличие межфазной границы (газ-жидкость или жидкость-жидкость). Её присутствие приводит к скачку диэлектрических свойств и накоплению связанных поляризационных зарядов, что существенно снижает общую электрическую прочность промежутка. В частности, для границы «масло–вода» при средних напряженностях поля ниже 5 кВ/см развитие классических стримеров в объеме любой из жидкостей невозможно [3], а тепловой механизм в воде также не реализуется из-за емкостного характера начального тока. Таким образом, доминирующую роль начинает играть электрогидродинамическая (ЭГД) неустойчивость.

При приложении импульсного электрического поля к границе двух несмешивающихся жидкостей с разной проводимостью и проницаемостью на этой границе индуцируются свободные заряды. Взаимодействие внешнего поля с этими зарядами создает тангенциальные электростатические силы (давление), вызывающие неустойчивость границы по типу неустойчивости Тонкса-Френкеля [13]. Это приводит к нелинейной деформации границы – появлению остроконечных выступов или ячеистой структуры; ЭГД-течениям – формированию конвективных потоков в обеих жидкостях; взрывному росту возмущений – при превышении критической напряженности, выступ со стороны более проводящей жидкости (воды) может вытянуться в тонкую струю, способную быстро достичь противоположного электрода и вызвать замыкание промежутка. Этот процесс может происходить на порядки медленнее, чем стримерный пробой и приводить к замыканию промежутка.

Исследования показывают, что поляриность импульса, геометрия электродов и соотношение проводимостей жидкостей являются ключевыми параметрами, определяющими

морфологию деформации и пороговую напряженность [14–17].

В работе [18] было проведено экспериментальное и численное исследование поведения границы раздела «вода–трансформаторное масло», где в качестве высоковольтного электрода выступала сфера. Результаты моделирования давали отставание от реальной высоты конуса примерно в 1,4 раза, что связывали с двумерностью постановки задачи.

Целью настоящей работы является экспериментальное и численное исследование поведения границы раздела «вода–трансформаторное масло», где в качестве высоковольтного электрода выступает цилиндр с рабочим торцом в виде полусферы. Такая постановка делает возможным трехмерное осесимметричное моделирование, которое было невозможным с предшествующей геометрией электрода из-за численных осцилляций, возникавших у противоположного от границы жидкостей полюса сферы. В случае цилиндрического электрода такой проблемы не возникает, а результаты моделирования с хорошей точностью совпадают с экспериментом.

Экспериментальная установка и методы математического моделирования

Экспериментальная установка, использованная в настоящей работе, идентична, [18] за исключением высоковольтного электрода, который в данной работе был выбран цилиндрическим, диаметром 7 мм, рабочий торец которого, обращенный к границе раздела вода–масло, выполнен в виде полусферы того же диаметра. Ниже приведем краткое описание. Для проведения исследований в прозрачную емкость из оргстекла наливается слой воды (300 мкСм/см), на который затем наливается слой трансформаторного масла. Толщина слоёв выбирается таким образом, чтобы граница раздела оказалась между верхним и нижним электродами и была равноудалена от них. Заземленный электрод, выполненный из латунного стержня диаметром 1,6 мм со скругленной кромкой на рабочем торце, помещается в слой воды. Высоковольтный электрод в виде латунного стержня диаметром 7 мм, погружается в слой масла на глубину 12 мм. Наблюдение за разрядным

промежутком ведется при помощи микроскопа МБС-10 и фотокамеры Phantom v2012. Импульс напряжения формируется при помощи полупроводникового высоковольтного коммутатора (типа «полумост»), подключенного к ударной емкости. Коммутатор способен поднимать до требуемой величины (равно как и опускать до 0) потенциал высоковольтного коммутатора за время порядка 100 нс.

Моделирование проводится в осесимметричной постановке в цилиндрической области, в которую введены два электрода. Нижний электрод имеет радиус 0,8 мм, его высота 25 мм, радиус скругления кончика электрода – 0,4 мм. Нижний электрод погружен в воду на глубину 3 мм. Внешняя цилиндрическая граница находится на расстоянии 40 мм от оси электрода. Над слоем воды толщиной 28 мм располагается слой масла толщиной 12 мм. В него полностью погружен закругленный электрод радиусом 3,5 мм. Таким образом, его нижняя поверхность находится на расстоянии 3 мм от границы раздела сред. Нижний электрод является заземленным (напряжение $V = 0$ В), на верхний подается постоянное напряжение, равное $V = 3360, 3900, 4440$ В. Область течения дополнительно разделена на несколько подобластей, которые покрываются сеткой с различными характеристиками. В частности, в областях, в которых фазовый состав не меняется, используется расчетная сетка из треугольников. Во всех остальных областях, по которым движется граница раздела фаз, задается ортогональная сетка. Для совместного решения уравнений Пуассона, Навье-Стокса, а также переноса фазы выполняется пространственная дискретизация на основе метода конечных элементов. Для дискретизации по времени используется неявная схема Эйлера с переменным шагом. В алгоритме используется расщепление по физическим процессам: на каждом шаге по времени последовательно рассчитываются электрическое поле, распределение скоростей и давлений в возникающем течении, а также движение границы раздела сред. Межфазная граница имеет конечную толщину и моделируется на основе метода Level-Set [19]. Возникновение движущей электростатической

силы обусловлено дивергенцией тензора напряжений Максвелла в среде с неоднородной диэлектрической проницаемостью.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены кинограммы движения границы раздела вода–трансформаторное масло под действием импульсного напряжения амплитудой 3360, 3900 и 4440 В. В первые моменты после подачи напряжения деформация границы вблизи оси электрода происходит практически равномерно, как и в случае сферического электрода [18]. Затем граница приобретает заметную кривизну с постоянным по знаку радиусом. При высоте около 1 мм на границе начинает формироваться острая вершина (радиус кривизны меняет свой знак). Дальнейшее движение воды вглубь масла происходит за счет обострения и вытяжения вершины границы раздела. Когда до электрода остается около 0,2 мм, с вершины конуса начинают отделяться мелкие капли: а) 42,5 мс, б) 34,826 мс, в) 29 мс – и формируют поток, который и достигает поверхности электрода. Электрический пробой (34,994 мс на рис. 1б) инициируется в результате одновременного отделения и вытяжения множества капель, которые в результате формируют тонкий водный канал, окончательно замыкающий промежуток, либо оказываются на расстояниях между собой, достаточных для пробоя масляного промежутка. Формирование плазменного канала при этом наблюдается только в тонкой верхней части конуса, где плотность тока была достаточной для теплового механизма инициации. С увеличением напряжения сокращается общее время процесса, а форма границы раздела проходит через схожие состояния (см., например, 34,826, 29 и 25 мс для а), б) и в), соответственно).

На рисунке 2 представлены кривые положения вершины конуса. Индексы «э» и «м» относятся, соответственно, к результатам эксперимента и моделирования. Трехмерная постановка задачи дает гораздо лучшее совпадение с экспериментом по сравнению с двумерной [18].

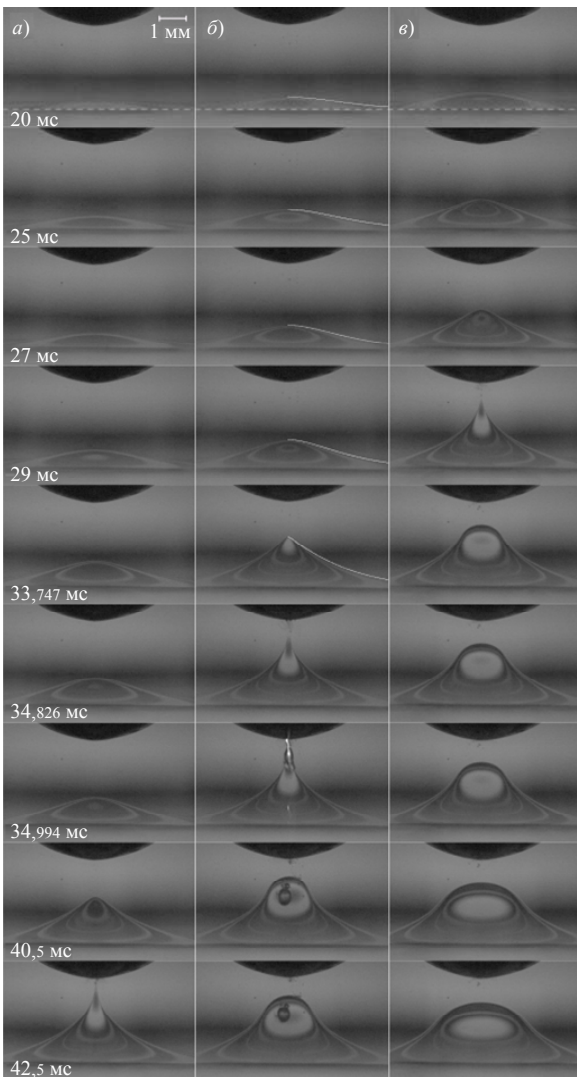


Рис. 1. Кинограмма движения границы раздела воды и трансформаторного масла в вертикальном электрическом поле при напряжении а) 3360, б) 3900, в) 4440 В. Результаты моделирования положения границы отмечены белой линией для случая 3900 В на кадрах 20–33,747 мс. Пунктиром указано положение невозмущенной границы

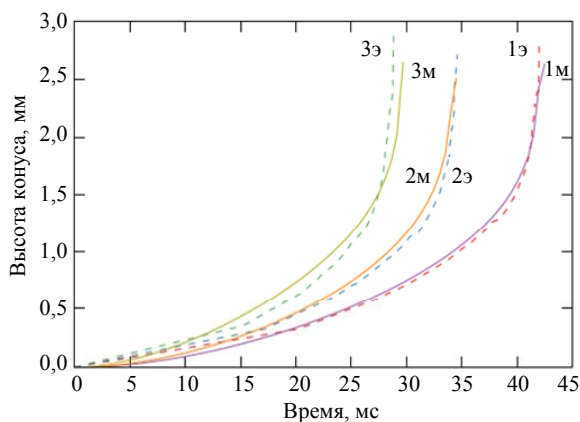


Рис. 2. Графики зависимости положения вершины конуса от времени после подачи напряжения в экспериментах (с отметкой «э») и численном моделировании (с отметкой «м») при напряжении 1) 3360, 2) 3900 и 3) 4440 В

Движение вершины происходит с постоянным увеличением скорости (кривая 2 на рис. 3) за счет постоянного увеличения сил со стороны электрического поля, возрастающего при сокращении дистанции между вершиной и поверхностью высоковольтного электрода.

На рисунке 3 представлена динамика нормированных (на максимум) величин высоты конуса H , скорости движения вершины v и объема V видимой части конуса для наиболее медленного случая 3360 В на этапе роста и спада конуса. Примечательно, что своих максимальных значений величины достигают одновременно. Первым наступает максимум скорости – порядка 1 м/с. Это связано с началом распыления жидкости с вершины, что замедляет продвижение отчетливо видимой части вершины. Максимальное значение высоты H_{max} составляет 2,86 мм, что меньше начального расстояния в 3 мм также вследствие распыления и снятия напряжения с электрода до наступления пробоя. Значительно позднее достигается максимум объема $V_{max} = 41 \text{ мм}^3$ видимой части конуса, что объясняется инерцией жидкости, движущейся внутри конуса. Данное значение является оценкой снизу, т. к. с течением времени все больший объем жидкости оказывается за пределами видимой области. Представленная картина качественно повторяется для всех рассматриваемых случаев напряжений.

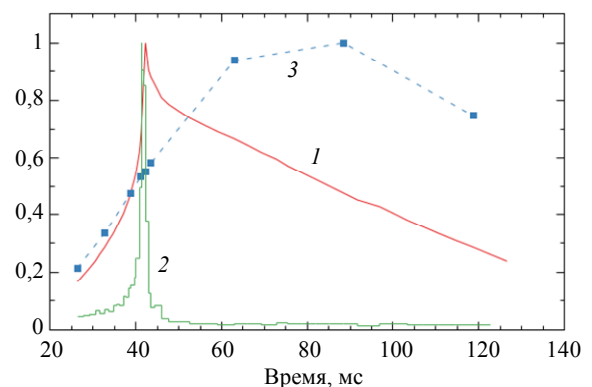


Рис. 3. Графики зависимости положения вершины конуса H/H_{max} (1), ее скорости v/v_{max} (2) и объема V/V_{max} конуса (3), нормированные на свои максимальные значения, на этапе роста и спада. Напряжение 3360 В. Спад импульса напряжения при $t = 42,2 \text{ мс}$. $(H_{max}, v_{max}, V_{max}) = (2,86 \text{ мм}, 1 \text{ м/с}, 41 \text{ мм}^3)$

На рисунке 4 представлено расширенное сравнение экспериментальных и численных результатов для случая 3360 В.

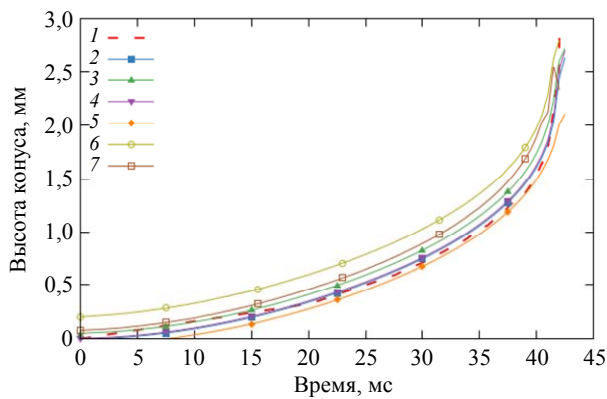


Рис. 4. Графики зависимости от времени положения вершины конуса H (1) в эксперименте (3360 В), и смоделированных значений $\varphi = 0,5$ (2), $v_z/\max\{v_z\} = 0,1$ (3), $v_z/\max\{v_z\} = 0,5$ (4), $v_z/\max\{v_z\} = 0,9$ (5), $\min\{F_z\}$ (6), $\max\{F_z\}$ (7)

Для каждого расчета рассматривается осевое (ось z) распределение трех величин: профиля фазовой переменной φ , профиля z -компоненты напряженности электрического поля, профиля z -компоненты скорости (V_z), профиля z -компоненты вынуждающей объемной силы (F_z). Для фазовой переменной в области значений $\varphi = [0, 1]$ выбирается количество линий уровня N , по которому определяется дискретный набор φ_i , исключая крайние значения 0 и 1. На каждом моменте времени t_i (для которого были получены результаты) определяется положение ближайших точек на профиле $\varphi = \varphi(z)$ для набора уровней φ_i , $i = 0, N-1$. Изменение положения точек во времени $z_i = z_i(t)$ позволяет построить набор соответствующих кривых и отождествить численные результаты для некоторой кривой с экспериментом. Основная причина, по которой рассматриваются несколько величин – конечная толщина межфазной границы, сильно превышающая свой физический аналог. Кроме того, она подвержена «расплыванию» в процессе расчета вследствие модельной диффузии. В случае скорости V_z в каждый момент времени выполняется нормировка профиля на максимальное значение, изменение линий уровня V_z строится аналогичным образом. Поведение уровней E_z оказывается подобным φ и потому не рассматривается. Профиль силы претерпевает очень сильные изменения в процессе расчета как по амплитуде (ее максимальные значения меняются на несколько порядков), так и по форме. Задание набора уровней для этой величины оказывает-

ся нецелесообразным. Однако можно отследить движение ее фронта. Первым очевидным «маркером» является положение максимума F_z в каждый момент времени. Рассматривая профили силы сразу после подачи напряжения, можно заметить, что пространственная дискретизация методом конечных элементов приводит к появлению немонотонности, а при дальнейшем смещении воды к высоковольтному электроду распределение F_z отличается сильными неоднородностями, которые могут распространяться с иной скоростью, чем «материальная» переменная φ . В качестве дополнительных критериев смещения межфазной границы можно рассмотреть положение последнего локального минимума на профиле $F_z = F_z(t)$. Наилучшее приближение обеспечивает профиль по средней линии $\varphi = 0,5$, линия уровня $\varphi = 0,1$ дает завышенное значение высоты конуса, а $\varphi = 0,9$ – заниженное в течение всего расчета. Аналогично фазовой переменной, линия уровня $V_z/\max\{V_z\} = 0,9$ для скорости дает заниженное значение высоты конуса для любого момента времени. На начальном отрезке ($t < 20$ мс) наилучшее приближение дается линией уровня $z_{V_z} = 0,0909$, на всем протяжении расчета наилучшее приближение дается средней линией. Использование в качестве маркера движения границы положений максимума F_z и локального минимума, ближайшего к высоковольтному электроду, дает завышенные значения высоты конуса и является неудовлетворительным.

Выводы

Экспериментально и с помощью численного моделирования исследовано движение границы раздела воды и трансформаторного масла в вертикальном электрическом поле. Получены данные о скорости движения границы, объеме вовлеченной жидкости и динамике вершины образующегося конуса воды на этапе его роста во время действия напряжения, а также на этапе обратного спада. Показано, что при отношении 2:1 диаметра D высоковольтного электрода к расстоянию l до границы раздела геометрия рабочего торца электрода определяет характер деформации границы, а его высота не оказывает заметного влияния на ее движение и развитие разряда.

Переход от двумерного к трехмерному осесимметричному моделированию позволил значительно сблизить экспериментальные и численные результаты для зависимости высоты конуса от времени. Изменение формы высоковольтного электрода со сферической на цилиндрическую с аналогичной полусферой на рабочем торце позволило оптимизировать вычислительные времязатраты (несмотря на трехмерную постановку) за счет полного исключения течений, возникающих у противоположного от разряда полюса сферы, которые слабо влияют на движение границы раздела жидкостей, однако требуют сопоставимых рассматриваемой задаче вычислительных ресурсов.

Несмотря на большое количество модельных гипотез и ограничений, связанных с конечной толщиной межфазной границы, эмпирическими коэффициентами в модели переноса фазовой переменной, приближенной формой записи объемной силы, в целом, удастся правильно описать движение границы «вода-масло» к высоковольтному электроду. Наилучшим способом представления этого движения являются линии фазовой переменной ϕ и нормированной осевой скорости $V_z/\max\{V_z\}$. Описание в терминах локальных экстремумов объемной силы $F_{es,z}$ является неудовлетворительным, однако показывает степень возмущения поля объемной силы вследствие конечной толщины межфазной границы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun C., Ohodnicki P. R., Stewart E. M. / IEEE Sens. J. 2017. Vol. 17. № 18. P. 5786–5806.

2. Hao J., Chen G., Liao R., Yang L., Tang C. / IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012. Vol. 19. № 4. P. 1456–1464.

3. Ушаков В. Я., Климкин В. Ф., Коробейников С. М., Лопатин В. В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005.

4. Lesaint O. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. № 14. P. 144001.

5. Chng T. L., Brisset A., Jeanney P., Starikovskaia S. M., Adamovich I. V., Tardiveau P. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. № 9. P. 09LT02.

6. Ding C., Khomenko A. Y., Shcherbanev S. A., Starikovskaia S. M. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. № 8. P. 085005.

7. Kosarev I. N., Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. № 1. P. 015005.

8. Liu Z., Hara K., Shneider M. N. / Phys. Fluids. 2023. Vol. 35. № 4. P. 042101.

9. Shneider M. N., Pekker M. Liquid Dielectrics in an Inhomogeneous Pulsed Electric Field. – Institute of Physics Publishing, 2019.

10. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. № 9. P. 095022.

11. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L. / Plasma Sources Sci. Technol. 2020. Vol. 29. № 7. P. 075004.

12. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L., Shneider M. N. / Phys. Rev. E. 2021. Vol. 103. № 6. P. 063201.

13. Tonks L. / Phys. Rev. 1935. Vol. 48. P. 562.

14. Александров Г. Н., Иванов В. Л., Кадомская К. П., Козырев Н. А., Костенко М. В., Кучинский Г. С., Половой И. Ф., Рябов Б. М., Хоберг В. А. Техника высоких напряжений. – М.: Высшая школа, 1973.

15. Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Савельев А. С. / Прикладная физика. 2017. № 5. С. 5–9.

16. Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. / Прикладная физика. 2016. № 1. С. 61–65.

17. Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Ветчинин С. П. / Прикладная физика. 2020. № 6. С. 5–9.

18. Панов В. А., Куликов Ю. М., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Савельев А. С. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 5–10.

19. Olsson E., Kreiss G. / J. Comput. Phys. 2005. Vol. 210. № 1. P. 225–246.

PACS: 52.80.Wq

The influence of local conductivity inhomogeneities on the shape of a discharge channel in water

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 9.02.2026; revised 5.03.2026; accepted 27.04.2026

The paper experimentally demonstrates the effect of formation of counter discharge channels during breakdown initiation in weakly conducting water along a trace with increased conduc-

tivity from a moving crystal of table salt. The first channel is initiated in the gap between the high-voltage electrode and the salt crystal, due to which the current begins to flow mainly along the trace with increased conductivity as a result of the crystal dissolution. The second channel is initiated inside the trace at some distance from the crystal and has no direct contact with the grounded electrode, which is located at a distance of 8 mm. The counter motion of the discharge channels leads to their unification and final formation of a single channel. This effect is explained based on numerical modeling, which consists in the presence of vortex structures in the trace directly behind the moving crystal, which form a wider, compared to the main part of the trace, region with lower salt concentration and conductivity. As a result, the current density in this region is lower than in the main part of the trace, which leads to later boiling of the liquid and the appearance of a plasma channel.

Keywords: conductive water, transformer oil, pulsed electric field, water cone, EHD flows.

REFERENCES

1. Sun C., Ohodnicki P. R., and Stewart E. M., IEEE Sens. J. **17** (18), 5786–5806 (2017).
2. Hao J., Chen G., Liao R., Yang L., and Tang C., IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. **19**, 1456–1464 (2012).
3. Ushakov V. Ya., Klimkin V. F., and Korobeynikov S. M. Impulse Breakdown of Liquids. Berlin Heidelberg New York, Springer, 2007.
4. Lesaint O., J. Phys. D: Appl. Phys. **49** (14) 144001 (2016).
5. Chng T. L., Brisset A., Jeanney P., Starikovskaia S. M., Adamovich I. V., and Tardiveau P., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (9), 09LT02 (2019).
6. Ding C., Khomenko A. Y., Shcherbanev S. A., and Starikovskaia S. M., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (8), 085005 (2019).
7. Kosarev I. N., Starikovskiy A. Y., and Aleksandrov N. L., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (1), 015005 (2019).
8. Liu Z., Hara K., and Shneider M. N., Phys. Fluids. **35** (4), 042101 (2023).
9. Shneider M. N. and Pekker M. Liquid Dielectrics in an Inhomogeneous Pulsed Electric Field. Institute of Physics Publishing, 2019.
10. Starikovskiy A. Y. and Aleksandrov N. L., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (9), 095022 (2019).
11. Starikovskiy A. Y. and Aleksandrov N. L., Plasma Sources Sci. Technol. **29** (7), 075004 (2020).
12. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L., and Shneider M. N., Phys. Rev. E. **103** (6), 063201 (2021).
13. Tonks L., Phys. Rev. **48**, 562 (1935).
14. Aleksandrov G. N., Ivanov V. L., Kadomskaya K. P., Kozyrev N. A., Kostenko M. V., Kuchinskij G. S., Polovoj I. F., Ryabov B. M., and Hoberg V. A. Tekhnika vysokih napryazhenij. Moscow, Vysshaya shkola, 1973 [in Russian].
15. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., and Saveliev A. S., Plasm. Phys. Rep. **44** (9), 882–885 (2018).
16. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., and Son E. E., Plasm. Phys. Rep. **42**, 1074 (2016).
17. Panov V. A., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., and Saveliev A. S., Plasm. Phys. Rep. **47**, 623 (2020).
18. Panov V. A., Kulikov Yu. M., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., and Saveliev A. S., Applied Physics, № 6, 5–10 (2023) [in Russian].
19. Olsson E. and Kreiss G., J. Comput. Phys. **210**, 225–246 (2005).

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