

**Электрический пробой в слое трансформаторного масла над слоем воды***В. А. Панов, Л. М. Василяк, В. Я. Печеркин, С. П. Ветчинин, Ю. М. Куликов*

*Экспериментально исследовано развитие электрического пробоя через границу раздела двух жидкостей с различной электропроводностью и различной диэлектрической проницаемостью: слой трансформаторного масла над слоем воды в импульсном электрическом поле, направленном по нормали к границе раздела. Обнаружено, что сначала под действием электрического поля поверхность воды начинает прогибаться в слой масла, затем развивается конусообразная неустойчивость границы раздела жидкостей и конус воды быстро втягивается в масло вблизи высоковольтного электрода, погруженного в масло. Слой масла у электрода становится тонким, либо конус воды достигает электрода, в результате чего возникает пробой.*

*Ключевые слова:* электрический пробой, вода, трансформаторное масло, неустойчивость границы жидкостей.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-5-10

**Введение**

Электрический пробой воды и трансформаторного масла исследован достаточно хорошо, т. к. масло является одним из наиболее часто используемых диэлектриков в электроэнергетическом оборудовании, а пробой в воде важен для различных применений, например для дроблений материалов, очистки жидкостей, электрохимии. Исследуются пробой и частичные разряды как в чистом трансформаторном масле [1], так и в смесях с другими жидкостями [2, 3], а также в двухфазных средах масло-газ [4–7] и др. Одним из критических параметров масляной изоляции является влажность [8]. Наличие влаги очень сильно влияет на электрическую прочность

маслонаполненного оборудования. Образование конденсата может стать причиной внутреннего пробоя и даже разрушения маслонаполненного трансформатора [9]. В однородной жидкости возможны два механизма электрического пробоя: стримерно-лидерный и тепловой. К настоящему времени стримерно-лидерный механизм пробоя достаточно хорошо исследован в различных диэлектрических жидкостях [10, 11] в сильных электрических полях с напряженностью  $10^5$ – $10^6$  В/см. Как правило, такой пробой реализуется при импульсных напряжениях в резко неоднородном электрическом поле при нано- и микросекундных длительностях импульса и напоминает пробой в плотных газах атмосферного давления [10]. Тепловой пробой обычно реализуется в жидкостях с достаточно высокой удельной электропроводностью, например, в воде [12]. Наличие межфазной границы существенно снижает электрическую прочность как трансформаторного масла с пузырьками воздуха [5, 6], так и воды с пузырьками воздуха [13–17].

Развитие пробоя через границу раздела слоев диэлектрических жидкостей не исследован, хотя этот случай важен для практики. Образование слоя воды на дне маслонапол-

**Панов Владислав Александрович**, с.н.с., к.ф.-м.н.  
E-mail: panovvladislav@gmail.com

**Василяк Леонид Михайлович**, гл.н.с., д.ф.-м.н.

**Печеркин Владимир Яковлевич**, с.н.с., к.ф.-м.н.

**Ветчинин Сергей Петрович**, с.н.с., к.ф.-м.н.

**Куликов Юрий Матвеевич**, н.с., к.ф.-м.н.

Объединенный институт высоких температур РАН,  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 22 июня 2022 г.

© Панов В. А., Василяк Л. М., Печеркин В. Я.,  
Ветчинин С. П., Куликов Ю. М., 2022

ненного оборудования возможно при выключении оборудования на длительный срок. Соответственно, при включении такого оборудования возможен пробой. Важен для практики и другой случай, когда на поверхности воды находится слой масла. В этом случае напряжение пробоя может возрасти, и механизм пробоя может измениться. Такая ситуация важна при очистке воды электрическими разрядами и при других применениях. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование механизма развития электрического пробоя в системе из слоя масла над слоем воды.

### Экспериментальная установка

Схема эксперимента и разрядного промежутка приведена на рис. 1. В прозрачную емкость из оргстекла наливается слой воды (1), на который затем наливается слой трансформаторного масла (2) марки ГК (ГОСТ Р 54331-2011, МЭК 60296:2003). Наполнение происходит медленно через тонкую иглу, чтобы предотвратить колебания поверхности жидкости и образование у стенки высокого мениска, который ухудшает изображение границы раздела жидкостей. Толщина слоёв выбирается таким образом, чтобы гра-

ница раздела оказалась между электродами и была равноудалена от них. Заземленный электрод (4), выполненный в виде латунного стержня со скругленной кромкой на рабочем торце, помещается в слой воды. Высоковольтный (ВВ) электрод (3), на конце которого закреплена латунная сфера, погружается в слой масла. Наблюдение за разрядным промежутком ведется при помощи микроскопа МБС-10, оборудованного оптическим выходом для подключения фотокамеры, и макрообъектива Tokina Macro 100f2.8. Фоторегистрация процессов ведется скоростной фотокамерой Phantom v2012 (7) в проходящем свете от люминесцентной лампы 8 Вт T5/G5 (6), установленной позади емкости на уровне границы раздела. Для того, чтобы граница раздела, деформированная вблизи стенки капиллярными силами, не мешала оптическому наблюдению за процессом, камера установлена несколько выше этой границы, а её оптическая ось наклонена под небольшим углом к горизонтали. Использование протяженного источника света, ориентированного перпендикулярно оптической оси камеры, позволило наглядно визуализировать не только общий профиль получающейся при подаче напряжения фигуры, но и проследить за боковой поверхностью.

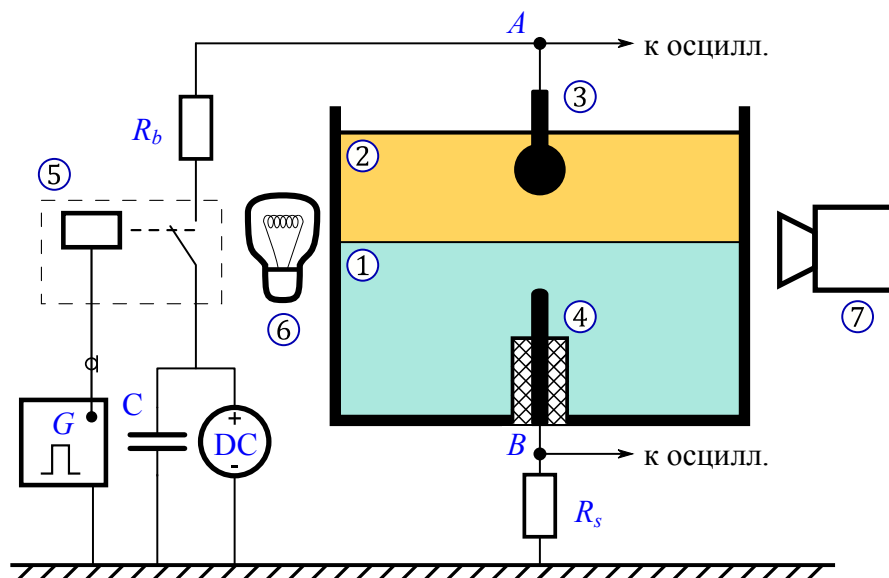
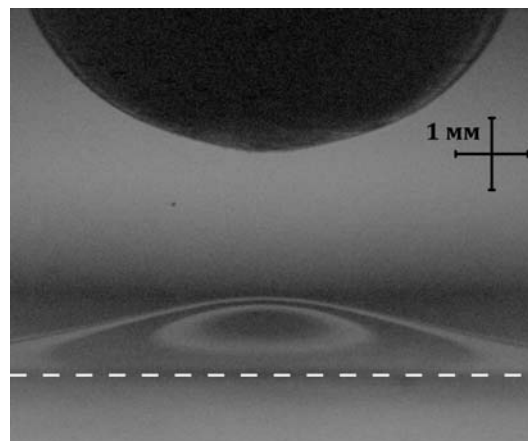


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – слой воды; 2 – слой трансформаторного масла; 3 – высоковольтный электрод; 4 – заземленный электрод в диэлектрическом держателе; 5 – управляемый ключ; 6 – лампа подсветки; 7 – скоростная фотокамера; A – точка измерения напряжения на высоковольтном электроде; B – точка измерения напряжения на токовом шунте; C – ударная ёмкость; DC – высоковольтный источник питания; G – управляющий генератор импульсов/задержек;  $R_b$  – балластное сопротивление,  $R_s$  – резистивный токовый шунт

Импульс напряжения формируется при помощи полупроводникового ВВ коммутатора (5) Behlke HTS 301-03-GSM, подключенного к ударной емкости (С). Время нарастания напряжения на переднем фронте импульса между уровнями 10 и 90 % составляет 7 мкс. Емкость постоянно заряжается источником питания (DC) Spellman SL100PN300 до рабочего напряжения в режиме ограничения по току не более 0,5 мА. Напряжение на ВВ электроде регистрируется в точке А при помощи пассивного высоковольтного пробника Tektronix P6015A, ток в цепи разрядного промежутка вычисляется по величине напряжения на токовом шунте  $R_s$ , регистрируемого в точке В. Запись электрических сигналов ведется осциллографом LeCroy HDO4054. Синхронизированный запуск всех элементов осуществляется генератором импульсов (G) с регулируемыми задержками Berkeley Nucleonics BNC575. Балластное сопротивление  $R_b = 5,5$  кОм; сопротивление токового шунта  $R_s = 2$  Ом; ударная емкость  $C = 0,77$  мкФ, амплитуда приложенного напряжения  $U_{ap}$  не более 25 кВ. Разрядная ячейка: внутренние размеры емкости 80×80×80 мм, диаметр сферы ВВ электрода 7 мм; диаметр стержня заземленного электрода 1,6 мм; длина неизолированной части стержня 25 мм; минимальное расстояние от вершины стержня до границы раздела жидкостей 3(+0,5) мм; минимальное расстояние от поверхности сферы до границы раздела жидкостей 3(+0,5) мм; толщина слоя воды 50 мм; толщина слоя масла 10 мм.

### Результаты и обсуждение

При приложении напряжения пробой промежутка не наблюдается до напряжения 1,55 кВ. При этом по мере увеличения напряжения в промежутке наблюдается все более заметное движение и деформация границы раздела жидкостей. При фиксированном значении амплитуды допробойного напряжения стационарное состояние границы раздела, деформированной под действием электрического поля, устанавливается за время около 5 с (рис. 2). После этого движение границы прекращается, и система может долго находиться в таком состоянии без дальнейшего развития разряда и образования дугового канала.

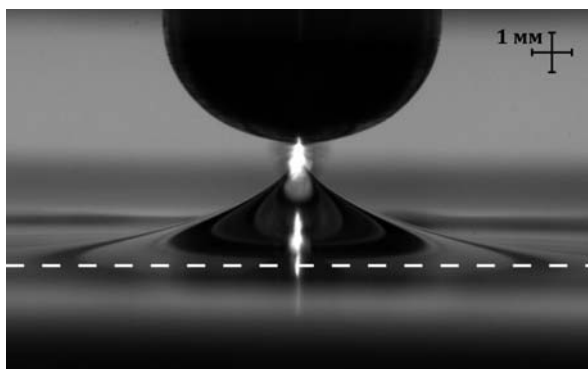


*Рис. 2. Стационарное состояние деформированной границы раздела под действием электрического поля при  $U_{ap} = 1,53$  кВ. Пунктиром обозначено начальное положение невозмущенной границы раздела. Темная полусфера в верхней части рисунков – видимая часть сферического ВВ электрода. Второй электрод погружен в воду (на рисунке не виден). Светлые полосы на поверхности образующегося конуса – изображение протяженного источника подсветки, формирующееся конусом, который выступает в качестве оптической линзы.*

При подаче напряжения выше пробойного сразу начинается движение воды к высоковольтному электроду и деформация границы раздела. Изначально, профиль границы имеет постоянную по знаку кривизну поверхности, выпуклый вверх. По мере приближения к ВВ электроду, вблизи вершины появляется перегиб и формируется выраженная вершина. С этого момента продвижение границы раздела происходит в основном за счет изменения геометрии вершины и ее вытягивания. При этом сформированное основание конуса далее уже практически не меняет своего положения. После того, как вершина водяного конуса достигает поверхности высоковольтного электрода, дальнейшее развитие процесса возможно по разным механизмам – быстрому стримерному и более медленному тепловому.

Развитие электрического пробоя в воде с удельной электропроводностью около 300 мкСм/см происходит по тепловому механизму при напряжении около 6,5 кВ в промежутке 1 см [10, 11]. Таким образом, при толщине водяного слоя 3 мм можно ожидать напряжение пробоя по тепловому механизму около 3 кВ. Тепловой механизм развития неразрывно связан с протеканием токов проводимости, которые приводят к образованию

парогазовых областей у ВВ электрода, их ионизации и образованию плазменной области после развития тепловой неустойчивости. В исследуемой системе двух жидкостей протекание тока проводимости ограничено слоем трансформаторного масла, а основное движение зарядов на начальном этапе развития пробоя связано только с токами смещения на переднем фронте импульса напряжения. Поэтому тепловой механизм возможен только в случае достижения конусом воды поверхности ВВ электрода и достаточно высокой проводимостью воды (рис. 3).



**Рис. 3.** Образование плазменного канала после касания конусом воды высоковольтного электрода при повышенном значении электропроводности ( $2 \text{ мСм/см}$ ,  $U_{\text{пр}} = 2,05 \text{ кВ}$ ). Время  $270 \text{ мс}$  после подачи напряжения

При повышении напряжения возможен пробой заметной толщины масляного зазора, отделяющего вершину конуса от поверхности высоковольтного электрода. Этому также способствуют капли воды, которые отделяются от вершины конуса. Они появляются под действием электрического поля в результате формирования струи, известной как электроспрей. Формирование струи происходит при достижении критического угла при вершине конуса, который составляет около  $98^\circ$ . Т. к. при приближении к высоковольтному электроду напряженность поля у вершины конуса возрастает, т. е. имеет место «положительная обратная связь», при которой электрическое поле втягивает воду, расстояние сокращается, напряженность возрастает, и вслед за ней возрастают сила и скорость втягивания. При повышении напряжения формирование конуса происходит за меньшие времена, вершина конуса достигает критического угла за меньшее время и при меньшей высоте конуса. Следует

отметить, что образование конуса в слоях вода-масло ранее наблюдалось [18], однако электрический пробой в такой системе ранее не был исследован.

## Заключение

Таким образом, впервые с помощью скоростной видеосъемки показано, что инициатором пробоя двухслойной системы вода-трансформаторное масло является развитие электрогидродинамической неустойчивости межфазной границы и ее нелинейная деформация в сильном вертикальном электрическом поле. Время пробоя целиком определяется временем развития этой неустойчивости в вертикальном направлении и достижением вершиной конуса воды противоположного высоковольтного электрода. После контакта с поверхностью высоковольтного электрода напряжение пробоя и механизм пробоя будут зависеть от свойств воды, при этом напряжение пробоя будет всегда меньше напряжения пробоя слоя масла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Торшин Ю.В. Физические процессы формирования электрического пробоя конденсированных диэлектриков: Для внутренней изоляции аппаратов высокого, сверх- и ультравысокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 2008.
2. Lyutikova M., Korobeinikov S., Mohan Rao U., Fofana I. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2022. Vol. 29. № 2. P. 1.
3. Lyutikova M., Korobeinikov S., Konovalov A. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2021. Vol. 28. № 4. P. 1282.
4. Panov V. A., Kulikov Y. M., Son E. E., Tyuftyaev A. S., Gadzhiev M. Kh., Akimov P. L. // High Temp. 2014. Vol. 52. № 5. P. 770.
5. Недоспасов А. В., Исакаев Э. Х., Тюфтяев А. С., Гаджиев М. Х. // ЖТФ. 2015. № 7. С. 142.
6. Sargsyan M. A., Gadzhiev M. Kh., Tyuftyaev A. S., Akimov P. L., Demirov N. A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 774. P. 012202.
7. Гаджиев М. Х., Исакаев Э. Х., Тюфтяев А. С., Акимов П. Л., Юсупов Д. И., Куликов Ю. М., Панов В. А. // ЖТФ. 2015. № 7. С. 156.
8. Sun C., Ohodnicki P. R., Stewart E. M. // IEEE Sens. J. 2017. Vol. 17. № 18. P. 5786.
9. Korobeinikov S., Ridal A., Lyutikova M. // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2021. Vol. 9. № 2. P. 73.
10. Ушаков В. Я., Климкин В. Ф., Коробейников С. М., Лопатин В. В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005.

11. Lesaint O. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. № 14. P. 144001.
12. 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.
13. 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.
14. Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. // Прикладная физика. 2016. № 1. С. 61.
15. Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Савельев А. С. // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 5.
16. Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Ветчинин С. П. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 5.
17. Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Куликов Ю. М., Савельев А. С. // Прикладная физика. 2021. № 5. С. 32.
18. Taylor G. I. // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1964. Vol. 280. P. 383.

PACS: 52.80.-s

## Electrical breakdown in the transformer oil layer above the water layer

V. A. Panov, L. M. Vasilyak, V. Ya. Pecherkin, S. P. Vetchinin, 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 June 22, 2022

***The dynamics of electrical breakdown through the interface of two liquids with different electrical conductivity and different permittivity: a layer of transformer oil over a layer of water in a pulsed electric field directed normal to the interface is experimentally investigated. It was found that at first, under the influence of an electric field, the water surface begins to bend into the oil layer, then a cone-shaped instability of the liquid interface develops and the water cone is quickly drawn into the oil near a high-voltage electrode immersed in oil. The oil layer at the electrode becomes thin, or the water cone reaches the electrode, resulting in a breakdown.***

**Keywords:** electrical breakdown, water, transformer oil, fluid boundary instability.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-5-10

### REFERENCES

1. Yu. V. Torshin, *Fizicheskie processy formirovaniya elektricheskogo proboya kondensirovannykh dielektrikov: Dlya vnutrennej izolyacii apparatov vysokogo, sverh- i ul'travysokogo napryazheniya* (Energoatomizdat, Moscow, 2008) [in Russian].
2. M. Lyutikova, S. Korobeinikov, Rao U. Mohan, and I. Fofana, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. **29**, 1 (2022).
3. M. Lyutikova, S. Korobeinikov, and A. Kononov, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. **28**, 1282 (2021).
4. V. A. Panov, Y. M. Kulikov, E. E. Son, A. S. Tyuftyaev, M. Kh. Gadzhiev, and P. L. Akimov, High Temp. **52**, 770 (2014).
5. A. V. Nedospasov, E. Kh. Isakaev, A. S. Tyuftyaev, and M. Kh. Gadzhiev, Tech. Phys. **60**, 1086 (2015).
6. M. A. Sargsyan, M. Kh. Gadzhiev, A. S. Tyuftyaev, P. L. Akimov, and N. A. Demirov, J. Phys.: Conf. Ser. **774**, 012202 (2016).

7. M. Kh. Gadzhiev, E. Kh. Isakaev, A. S. Tyuftyaev, P. L. Akimov, D. I. Yusupov, Yu. M. Kulikov, and V. A. Panov, *Tech. Phys.* **60**, 1101 (2015).
8. C. Sun, P. R. Ohodnicki, and E. M. Stewart, *IEEE Sens. J.* **17**, 5786 (2017).
9. S. Korobeynikov, A. Ridel, and M. Lyutikova, *Interfacial Phenomena and Heat Transfer* **9**, 73 (2021).
10. V. Y. Ushakov, *Impulse Breakdown of Liquids* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007).
11. O. Lesaint, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49**, 144001 (2016).
12. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, and E. E. Son, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49**, 385202 (2016).
13. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, and E. E. Son, *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**, 085019 (2019).
14. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, and E. E. Son, *Applied Physics*, No. 1, 61 (2016) [in Russian].
15. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, and A. S. Saveliev, *Plasma Phys. Rep.* **44**, 882 (2018).
16. V. A. Panov, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, and S. P. Vetchinin, *Plasma Phys. Rep.* **47**, 623 (2021).
17. V. A. Panov, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, Yu. M. Kulikov, S. P. Vetchinin, and A. S. Saveliev, *Applied Physics*, No. 5, 32 (2021) [in Russian].
18. G. I. Taylor, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* **280**, 383 (1964).