

УДК 537.52; 532.5.032

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-5-10

EDN: WAPZDP

PACS: 52.80.-s; 47.85.Dh



Электрогидродинамические течения в системе вода-масло в неоднородном импульсном электрическом поле

В. А. Панов, Ю. М. Куликов, В. Я. Печеркин, Л. М. Василяк, А. С. Савельев

Исследуется электрогидродинамический процесс движения в системе двух несмешивающихся жидкостей – проводящая вода и трансформаторное масло, под воздействием импульсного электрического поля, ориентированного перпендикулярно границе раздела. Показано, что при импульсном воздействии наблюдается более интенсивное движение проводящей воды, что приводит к её проникновению в слой более легкого масла, расположенного над водой. Это движение приводит к образованию и росту конуса воды в масле. Высота конуса зависит от амплитуды и длительности импульса приложенного напряжения. В результате экспериментов и моделирования определены характерное время достижения водяным конусом верхнего потенциального электрода. Результаты моделирования в хорошей степени совпадают с экспериментальными результатами.

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

Введение

Одним из критических параметров масляной изоляции высоковольтного оборудования является влажность [1]. Наличие влаги очень сильно влияет на электрическую прочность маслонеполненного оборудования. Образование конденсата может стать причиной внутреннего пробоя и разгерметизации трансформатора. В однородной жидкости возможны два механизма электрического пробоя: стримерно-лидерный и тепловой. К настоя-

щему времени стримерно-лидерный механизм пробоя достаточно хорошо исследован в различных диэлектрических жидкостях [2, 3] в сильных электрических полях с напряженностью 10^5 – 10^6 В/см. Как правило, такой пробой реализуется при импульсных напряжениях в сильно неоднородном электрическом поле при нано- и микросекундных длительностях импульса и напоминает пробой в плотных газах атмосферного давления [2, 4–12]. Наличие межфазной границы существенно снижает электрическую прочность промежутка [13]. Развитие пробоя через границу раздела диэлектрических жидкостей, либо «жидкость–газ» практически не исследовано, хотя ряд работ направлен на выявление роли распределенной газовой фазы и полярности на развитие пробоя [14–17]. При средней напряженности электрического поля в промежутке менее 5 кВ/см развитие стримеров невозможно как в масле, так и в проводящей воде [2]. В воде также невозможно развитие теплового пробоя, т. к. верхний электрод погружен в масло и начальный ток в промежутке является чисто емкостным. Взаимодействие импульсного

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

Куликов Юрий Михайлович, с.н.с., к.ф.-м.н.

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

E-mail: vpecherkin@yandex.ru

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

Савельев Андрей Сергеевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 16.09.2023

После доработки 30.09.2023

Принята к публикации 10.10.2023

© Панов В. А., Куликов Ю. М., Печеркин В. Я.,
Василяк Л. М., Савельев А. С., 2023

внешнего электрического поля с поляризационными зарядами на границе раздела двух жидкостей приводит к развитию неустойчивостей, взрывному росту возмущений, нелинейной деформации границы и возникновению электрогидродинамических течений жидкости. Эта ситуация наблюдается как для диэлектрических, так и для проводящих жидкостей [13]. В случае границы «проводящая вода–масло», появление остроконечных деформаций может привести к вытягиванию струек воды и замыканию промежутка. Это необходимо учитывать при рассмотрении вопросов электробезопасности высоковольтного масло наполненного оборудования. Образование водного конденсата и его движение в электрическом поле могут стать причиной пробоя и разгерметизации высоковольтных трансформаторов.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование и компьютерное моделирование предпробойной стадии в импульсном неоднородном электрическом поле на границе раздела двух слоев несмешивающихся жидкостей – воды и трансформаторного масла, расположенных друг над другом, когда один из электродов находится в воде, а другой — в масле.

Описание эксперимента и метода моделирования

Для проведения исследований в прозрачную емкость из оргстекла наливается слой воды, 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 латунной сферы диаметром 7 мм, погружается в слой масла на глубину 12 мм. 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 в проходящем свете от люми-

несцентной лампы 8 Вт T5/G5, установленной позади емкости на уровне границы раздела. Использование протяженного источника света, ориентированного перпендикулярно оптической оси камеры, позволило наглядно визуализировать не только общий профиль границы раздела, но и проследить за её поверхностью. Импульс напряжения формируется при помощи полупроводникового высоковольтного коммутатора (5) Behlke HTS 301-03-GSM, подключенного к ударной емкости. Время нарастания напряжения на переднем фронте импульса составляет 7 мкс. Ударная емкость постоянно заряжается источником питания постоянного тока Spellman SL100PN300 до рабочего напряжения в режиме ограничения по току. Напряжение на высоковольтном электроде регистрируется при помощи пассивного высоковольтного пробника Tektronix P6015A, ток в цепи разрядного промежутка вычисляется по величине напряжения на токовом шунте, установленном в цепи заземленного электрода между его выводом из разрядной ячейки и точкой заземления установки. Запись электрических сигналов ведется осциллографом LeCroy HDO4054. Синхронизированный запуск всех элементов установки осуществляется генератором Berkeley Nucleonics BNC575. Величина коэффициента поверхностного натяжения на границе воды и трансформаторного масла измерялась тензиометром Kruss K20 и составила $24,7 \pm 0,12$ мН/м. Электропроводность воды равна 280 мкСм/см.

Компьютерное моделирование наблюдаемого в эксперименте роста водного конуса из плоской границы раздела проводилось с помощью метода отслеживания межфазной границы [18] в двумерной постановке задачи. При моделировании динамики двух жидкостей, разделенных межфазной границей, подробно отслеживалась подвижная граница с учетом поверхностного натяжения, действующего на поверхности раздела жидкостей, распределение электрического поля и его действие на жидкий диэлектрик. Электропроводность воды при моделировании не учитывалась.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведены экспериментальные кинограммы изменения формы гра-

ницы раздела жидкостей во времени после подачи импульсного напряжения на электроды с амплитудой $U_{ар} = 1,80$ кВ. Штриховой линией на кинограммах показаны результаты моделирования. Изначально, до подачи напряжения, профиль границы раздела является плоским (рис. 1а). После подачи напряжения он начинает выгибаться вверх (рис. 1б). По мере приближения к высоковольтному электроду, вблизи вершины появляется перегиб и формируется выраженная вершина (рис. 1в, 1г). С этого момента продвижение границы раздела происходит в основном за счет изменения геометрии вершины и ее вы-

тягивания. При этом «основание» конуса далее уже практически не меняет своего положения.

На рисунке 2 приведено расчетное распределение величин напряженности электрического поля, где показано, что с увеличением времени действия импульса напряженности область максимальных значений напряженности электрического заметно уменьшается по мере формирования конуса и локализуется в промежутке между высоковольтным электродом и вершиной конуса достигая максимальной величины перед соприкосновением вершины конуса с электродом.

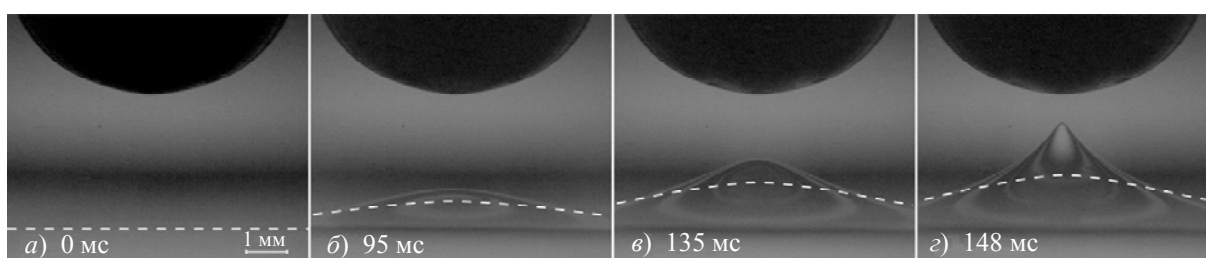


Рис. 1. Кинограмма деформации границы раздела и образования водяного конуса на допробойной стадии в системе двух жидкостей «вода–трансформаторное масло» в различные времена после подачи импульса напряжения: (а) – 0 мс; (б) – 95 мс; (в) – 135 мс; (г) – 148 мс. Пунктиром показаны результаты моделирования динамики раздела двух слоев в соответствующие эксперименту времена. На рисунке (а) пунктирной линией обозначено экспериментальное и расчетное стационарное положение границы раздела в отсутствие электрического поля, ниже линии находится вода, выше – масло. Темная полусфера в верхней части рисунков – видимая часть сферического электрода. Второй – заземленный 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. Величина приложенного напряжения составляет $U_{ар} = 1,80$ кВ

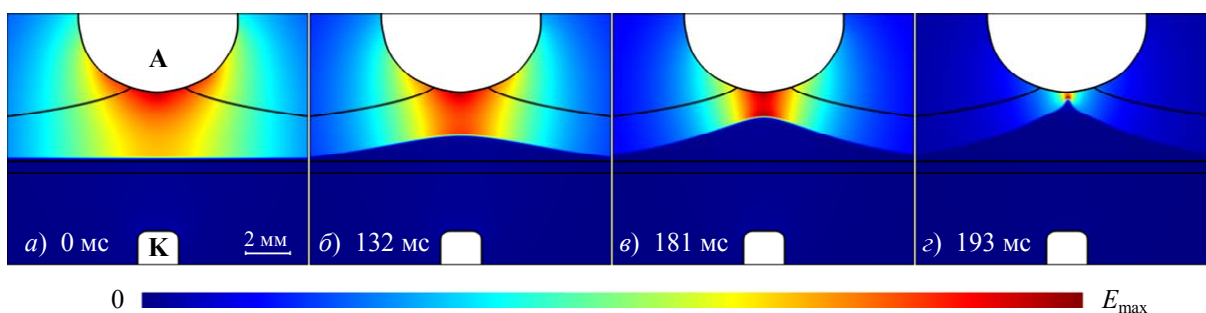


Рис. 2. Распределение модуля напряженности электрического поля в окрестности высоковольтного электрода при $V_0 = 1,8$ кВ в различные моменты времени: (а) – $t = 0,001$ с, $E_{max} = 8$ кВ/см; (б) – $t = 0,030$ с, $E_{max} = 11$ кВ/см; (в) – $t = 0,060$ с, $E_{max} = 16,5$ кВ/см; (г) – $t = 0,100$ с, $E_{max} = 52,5$ кВ/см. E_{max} – максимальное значение напряженности электрического поля. А и К – видимые части анода и катода

Анализ и обработка кинограмм позволили качественно и количественно охарактеризовать наблюдаемое явление разделения фаз деформации границы на рост «основания» и рост «вершины». График зависимости высоты

водяного конуса от времени после приложения напряжения (рис. 3) имеет два участка, Начальный практически линейный участок кривой 1 (длительностью 0–130 мс) соответствует росту «основания» конуса (рис. 1б, 1в)

с практически постоянной скоростью вершины около 5 мм/с. С появлением выраженной вершины (рис. 1з), линейный участок сменяется кривой с крутым нелинейным ростом на отрезке 135–145 мс. Последний отрезок времени до замыкания соответствует вытягиванию из вершины конуса тонкой струи воды под действием сильного локализованного электрического поля. Увеличение общей высоты конуса за счет удлинения струи происходит гораздо быстрее предыдущих этапов, и последний миллиметр промежутка пересекается такой струей всего за несколько миллисекунд, т. е. со скоростями на уровне м/с, что более чем на порядок превышает скорость роста конуса на начальном этапе. Известно [19], что по мере роста высоты конуса в проводящей воде угол при вершине обостряется и плотность заряда на его вершине увеличивается. В наших экспериментах нелинейный рост высоты конуса в масле с ускорением на стадии заострения также подтверждается (рис. 3).

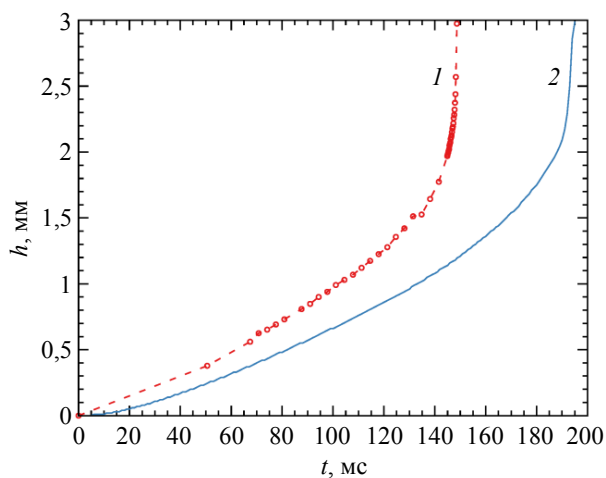


Рис. 3. График зависимости высоты водяного конуса от времени для напряжения 1,8 кВ: 1) – эксперимент, 2) – моделирование

После того, как вершина водяного конуса достигает поверхности высоковольтного электрода, дальнейшее развитие процесса возможно по разным механизмам (рис. 4). В случае низкой электропроводности и низкого напряжения, возникновение плазменного канала невозможно ни по тепловому, ни по стримерно-лидерному механизмам (рис. 4а). При повышенных значениях электропроводности воды, замыкание промежутка приводит к протекающей значительных токов.

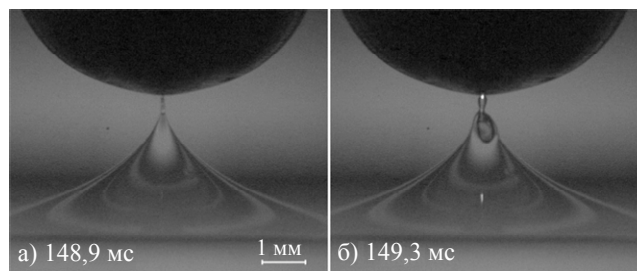


Рис. 4. Фото замыкания промежутка. (а) – без плазмообразования; (б) – с плазмообразованием

Когда плотность тока оказывается достаточной для развития взрывного вскипания и тепловой неустойчивости [20], с вершины конуса начинает развиваться плазменный канал (рис. 4б). Активное расширение парогазового слоя вокруг плазменного канала приводит к тому, что водяной конус отодвигается в сторону границы вода-масло, а его место занимает пузырь, внутри которого существует плазменный канал, т. е. фактически разряд начинает гореть в смеси паров воды и масла между высоковольтным электродом и поверхностью воды, которая выступает в роли жидкого электрода. Такая особенность – разряд в парах двух жидкостей, может быть использована при проведении разнообразных плазмохимических реакций, например, с жидкими углеводородами.

Заключение

В данной работе экспериментально и с помощью математического моделирования исследованы электрогидродинамические течения и формирование электрического пробоя поперек границы раздела воды и трансформаторного масла в импульсном электрическом поле. В исследованном диапазоне напряжений, заведомо меньших напряжения пробоя масла, пробой происходит через прорастание конуса воды через масло к высоковольтному электроду и замыкание промежутка. В зависимости от электропроводности и амплитуды приложенного напряжения после достижения конусом высоковольтного электрода возможно протекание тока без плазмообразования, появление плазменной области после касания, либо появление плазменной области до касания конуса за счет пробоя через отдельные капли, распыляемые с вершины конуса. Проведенное двумерное моделирование показало хорошее совпадение с экспериментом формы

образующегося конуса. Отставание по времени примерно в 1,4 раза от эксперимента связано, вероятно, с двумерной постановкой задачи, в которой теряется доля напряженности поля, связанная с протяженностью высоковольтной сферы по третьему направлению в модели. Учет электропроводности воды также может ускорить процесс за счет большего вытеснения поля из воды и его усиления на границе раздела. Таким образом, представляется целесообразным проведение дальнейших расчетов в трехмерной постановке и экспериментальные оценки эффективной толщины границы раздела с учетом капиллярных волн для уточнения модельной постановки.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда
(проект № 21-79-30062).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun C., Ohodnicki P. R., Stewart E. M. / IEEE Sens. J. 2017. Vol. 17. № 18. P. 5786–5806.
2. Ушаков В. Я., Климкин В. Ф., Коробейников С. М., Лопатин В. В. / Пробой жидкостей при импульсном напряжении. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005.
3. Lesaint O. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. № 14. P. 144001.
4. 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.
5. Ding C., Khomenko A. Y., Shcherbanev S. A., Starikovskaia S. M. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. № 8. P. 085005.
6. Kosarev I. N., Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. № 1. P. 015005.
7. Liu Z., Hara K., Shneider M. N. / Phys. Fluids. 2023. Vol. 35. № 4. P. 042101.
8. Shneider M. N., Pekker M. Liquid Dielectrics in an Inhomogeneous Pulsed Electric Field. — Institute of Physics Publishing, 2019.
9. Olsson E., Kreiss G. / J. Comput. Phys. 2005. Vol. 210. № 1. P. 225–246.
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. Starikovskiy A. Y., Bazelyan E. M., Aleksandrov N. L. / Plasma Sources Sci. Technol. 2022. Vol. 31. № 11. P. 114009.
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., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Куликов Ю. М., Савельев А. С. / Прикладная физика. 2021. Т. 5. С. 32–37.
19. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика в 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
20. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Son E. E. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. P. 385202.

PACS: 68.03.Hj

Electrohydrodynamic phenomena in the water-oil system in an electromagnetic pulsed electric field

V. A. Panov, Yu. M. Kulikov, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak and A. S. Saveliev

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

Received 16.09.2023; revised 30.09.2023; accepted 10.10.2023

The work examines the electrohydrodynamic process of movement in a system of two immiscible liquids – conducting water and transformer oil, under the influence of a pulsed electric

field oriented perpendicular to the interface. It has been shown that with pulsed action there is a more intense movement of conductive water, which leads to its penetration into a layer of lighter oil located above the water. This movement causes a cone of water in the oil to form and grow. The height of the cone depends on the amplitude and duration of the applied voltage pulse. As a result of experiments and modeling, the characteristic time for the water cone to reach the upper potential electrode was determined. The simulation results are in good agreement with the experimental results.

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-5-10

REFERENCES

1. Sun C., Ohodnicki P. R. and Stewart E. M., IEEE Sens. J. **17** (18), 5786–5806 (2017).
2. Ushakov V. Ya., Klimkin V. F. and Korobeynikov S. M., Impulse Breakdown of Liquids, New York, Springer Berlin Heidelberg, 2007.
3. Lesaint O., J. Phys. D: Appl. Phys. **49** (14) 144001 (2016).
4. Chng T. L., Brisset A., Jeanney P., Starikovskaia S. M., Adamovich I. V. and Tardiveau P., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (9), 09LT02 (2019).
5. Ding C., Khomenko A. Y., Shcherbanev S. A. and Starikovskaia S. M., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (8), 085005 (2019).
6. Kosarev I. N., Starikovskiy A. Y. and Aleksandrov N. L., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (1), 015005 (2019).
7. Liu Z., Hara K. and Shneider M. N., Phys. Fluids. **35** (4), 042101 (2023).
8. Shneider M. N. and Pekker M., Liquid Dielectrics in an Inhomogeneous Pulsed Electric Field, Institute of Physics Publishing, 2019.
9. Olsson E. and Kreiss G., J. Comput. Phys. **210** (1), 225–246 (2005).
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. Starikovskiy A. Y., Bazelyan E. M. and Aleksandrov N. L., Plasma Sources Sci. Technol. **31** (11), 114009 (2022).
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., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Kulikov Yu. M., Vetchinin S. P. and Saveliev A. S., Applied Physics, № 5, 32–37 (2021) [in Russian].
19. Landau L. D., Lifshitz E. M. and Pitaevskii L. P., Electrodynamics of Continuous Media: Vol. 8, Butterworth-Heinemann, 1984.
20. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya. and Son E. E., J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 385202 (2016).