

УДК: 532.23, 537.21

## Развитие неустойчивости границы раздела «вода – масло» в вертикальном электрическом поле

А. Н. Долуденко<sup>а</sup>, Ю. М. Куликов, В. А. Панов, А. С. Савельев,  
Д. В. Терешонок

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН),  
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

E-mail: <sup>а</sup> adoludenkon@gmail.com

Получено 31.10.2023, после доработки – 30.11.2023.

Принято к публикации 01.12.2023.

Наличие контактной границы между водой и маслом сильно снижает электрическую прочность масляной фазы. Присутствие электрического поля приводит к различной степени поляризации на границе раздела и появлению силы, действующей на жидкость с большей диэлектрической проницаемостью (вода) в направлении жидкости с меньшей диэлектрической проницаемостью (масло), что приводит к развитию неустойчивости контактной поверхности. Неустойчивость в результате своего развития приводит к вытягиванию струйки воды в толщу масла и нарушению изоляционного промежутка.

В настоящей работе экспериментально и численно исследуется электрогидродинамическая неустойчивость на границе фаз «электропроводящая вода – трансформаторное масло» в сильно неоднородном электрическом поле, направленном перпендикулярно контактной границе. Представлены результаты натурного и численного эксперимента по исследованию развития электрогидродинамической неустойчивости в сильном электрическом поле на границе раздела воды и трансформаторного масла, приводящей к деформации этой границы жидкостей. Система состоит из шарообразного электрода радиусом 3,5 мм, помещенного в воду проводимостью 5 мкСм/см, и тонкого электрода-лезвия толщиной 0,1 мм, помещенного в трансформаторное масло марки ГК. Контактная граница проходит на одинаковом расстоянии от ближайших точек электродов, равном 3 мм. В работе показано, что при некоторой напряженности электрического поля происходит рост конусообразной структуры воды в сторону электрода, погруженного в трансформаторное масло. Численно получено соответствие как формы образующейся водной структуры (конуса) в течение всего времени роста, так и размера, отсчитываемого от ее вершины до уровня начальной контактной границы разделения фаз. Исследована динамика роста данной структуры. И в численном расчете, и в эксперименте обнаружено, что размер образующегося конуса вдоль линии соединения электродов линейно зависит от времени.

Ключевые слова: конус Тейлора, схема МакКормака, слабосжимаемые жидкости, диэлектрическая проницаемость

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

© 2024 Алексей Николаевич Долуденко, Юрий Матвеевич Куликов, Владислав Александрович Панов, Андрей Сергеевич Савельев, Дмитрий Викторович Терешонок

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.  
Чтобы получить текст лицензии, посетите веб-сайт <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>  
или отправьте письмо в Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

UDC: 532.23, 537.21

## Development of the water – oil interface instability in a vertical electric field

A. N. Doludenko<sup>a</sup>, Yu. M. Kulikov, V. A. Panov, A. S. Saveliev,  
D. V. Tereshonok

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS),  
13/2 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

E-mail: <sup>a</sup> adoludenkon@gmail.com

*Received 31.10.2023, after completion – 30.11.2023.*

*Accepted for publication 01.12.2023.*

The presence of a contact boundary between water and transformer oil greatly reduces the electrical strength of the oil phase. The presence of an electric field leads to varying degrees of polarization at the interface and the appearance of a force acting on a liquid with a higher dielectric constant (water) in the direction of a liquid with a lower dielectric constant (oil). This leads to the contact surface instability development. Instability as a result of its development leads to a stream of water being drawn into oil volume and a violation of the insulating gap.

In this work, we experimentally and numerically study electrohydrodynamic instability at the phase boundary between electrically weakly conductive water and transformer oil in a highly inhomogeneous electric field directed perpendicular to the contact boundary. The results of a full-scale and numerical experiment of studying of the electrohydrodynamic instability development in a strong electric field at the interface between water and transformer oil are presented. The system consists of a spherical electrode with a radius of 3.5 mm, placed in water with a conductivity of 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , and a thin blade electrode 0.1 mm thick, placed in transformer oil of the GK brand. The contact boundary passes at the same distance from the nearest points of the electrodes, equal to 3 mm. The work shows that at a certain electric field strength, the cone-shaped structure of water grows towards the electrode immersed in transformer oil. A numerical correspondence was obtained for both the shape of the resulting water structure (cone) during the entire growth time and the size measured from its top to the level of the initial contact boundary of phase separation. The dynamics of this structure growth has been studied. Both in numerical calculations and in experiment, it was found that the size of the resulting cone along the electrode connection line depends linearly on time.

Keywords: Taylor cone, MacCormack method, weakly compressible fluids, dielectric constant

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2024, vol. 16, no. 3, pp. 633–645 (Russian).

This work was supported by the grant from the Russian Science Foundation (project No. 21-79-30062).

## Введение

Наличие контактной границы между водной и масляной фазами сильно снижает электрическую прочность [Александров и др., 1973]. Изучение воздействия электрического поля на жидкость со свободными границами раздела (плоские поверхности, струи, капли) имеет давнюю историю [Lord Rayleigh, 1882; Macky, 1931]. Однако развитие электрического пробоя через межфазную границу диэлектрических жидкостей исследовано недостаточно хорошо. Это явление может наблюдаться как для диэлектриков, так и для слабопроводящих жидкостей [Александров и др., 1973]. При превышении некоторого критического значения напряженности  $E > E^*$  возникает неустойчивость межфазной границы раздела, приводящая к ее нелинейной деформации. Плоская поверхность теряет устойчивость по отношению к монотонным возмущениям, причем  $E^*$  не зависит от вязкости жидкости. Рост возмущений и возникновение электрогидродинамического течения связаны с тем, что на межфазной границе «вода – масло» наблюдается резкое изменение диэлектрической проницаемости. Наличие электрического поля приводит к различной степени поляризации на границе раздела и появлению силы, действующей на жидкость с большей диэлектрической проницаемостью (воду) в направлении жидкости с меньшей диэлектрической проницаемостью (масла), что и приводит к развитию неустойчивости контактной поверхности [Loscertales et al., 2002]. При наличии границы фаз «проводящая вода – трансформаторное масло» возникающее начальное возмущение границы может в результате своего развития привести к вытягиванию струйки воды в толщу масла и нарушению изоляционного промежутка.

Численные и аналитические расчеты подтверждают образование такого рода струй в различных жидкостях – от идеальных диэлектриков до идеальных проводников [Ramos, Castellanos, 1994; Suvorov, Zubarev, 2004; Fernández de la Mora, 2007] для систем «жидкость – газ». Для систем с трансформаторным маслом в качестве второй среды такие исследования отсутствуют.

Актуальность настоящей задачи связана с исследованием предпробойных явлений в двухфазной среде. Эти явления имеют непосредственное отношение к безопасной работе высоковольтного маслонаполненного оборудования. Дело в том, что в процессе эксплуатации в оборудовании в том или ином количестве из атмосферы проникает вода. Наличие влаги сильно влияет на электрическую прочность, в том числе и масляной, изоляции, поэтому одним из важных параметров масляной изоляции является влажность [Sun, Ohodnicki, Stewart, 2017]. Образование явного конденсата может привести к электрическому пробоям с сопутствующими последствиями и выходу трансформатора из строя. В данной работе представлены результаты натурного и численного эксперимента по исследованию развития электрогидродинамической неустойчивости в сильном электрическом поле на границе раздела воды и трансформаторного масла, приводящей к деформации этой границы жидкостей.

## Описание эксперимента

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

В прозрачную емкость из оргстекла наливается слой дистиллированной воды проводимостью около 5 мкСм/см (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 слоев выбирается таким образом, чтобы граница раздела оказалась между электродами и была равноудалена от них. Заземленный электрод (4), выполненный в виде латунной сферы, помещается в слой воды. Высоковольтный (ВВ) электрод (3), представляющий из себя лезвие толщиной 0,1 мм, погружается в слой масла. Наблюдение за разрядным промежутком ведется при помощи микроскопа

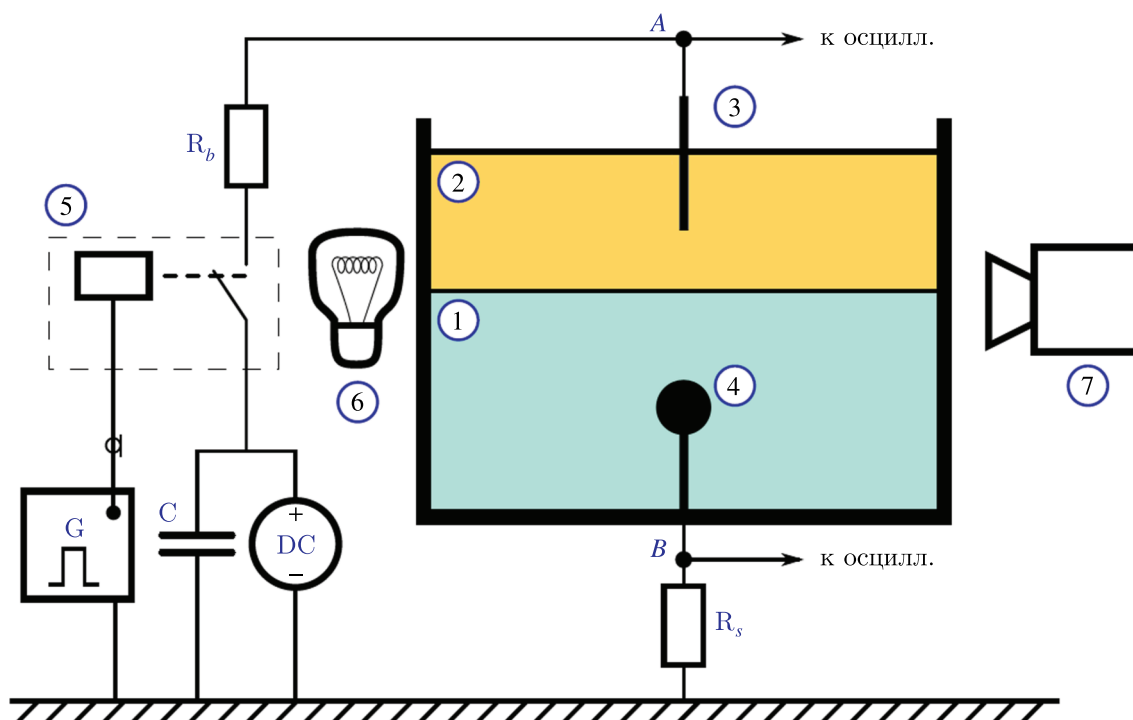


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 — слой воды, 2 — слой трансформаторного масла, 3 — высоковольтный электрод, 4 — заземленный электрод в диэлектрическом держателе, 5 — управляемый ключ, 6 — подсветка наблюдаемой области, 7 — скоростная фотокамера, А — точка измерения напряжения на высоковольтном электроде, В — точка измерения напряжения на токовом шунте, С — ударная емкость, D — высоковольтный источник питания, G — управляющий генератор импульсов/задержек,  $R_b$  — балластное сопротивление,  $R_s$  — резистивный токовый шунт

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 ее оптическая ось наклонена под небольшим углом к горизонтالي. Использование протяженного источника света, ориентированного перпендикулярно оптической оси камеры, позволило не только наглядно визуализировать общий профиль получающейся при подаче напряжения структуры, но и проследить за боковой поверхностью.

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 (G) импульсов/задержек 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.

## Постановка задачи численного расчета и применяемые численные методы

Моделирование проводится в системе из двух жидкостей: воды и трансформаторного масла марки ГК, находящихся в прямоугольной расчетной ячейке, представленной на рис. 2, а. Длина ячейки  $MN = 40$  мм, ее ширина  $EM = 20$  мм. Расчетная ячейка представляет собой сечение плоскостью, проходящей через центр шарообразного электрода, который заземлен, и перпендикулярной плоскости высоковольтного электрода-лезвия. В данной постановке шарообразный электрод обладает осевой симметрией относительно оси  $BE$ , а электрод-лезвие не обладает такой симметрией. По этой причине для расчета электрического поля осевая симметрия задачи не использовалась, а расчет производился в предположении того, что электрод, являющийся на самом деле сечением сферы, представляет сечение цилиндра. Действительное измеренное центральное сечение сферического электрода несколько отличается от сферы и представлено на рис. 2, б. В модели шарообразный электрод приближен сечением идеальной сферы диаметром 7 мм. Далее приведены некоторые используемые линейные размеры:  $OC = 3$  мм,  $CE = 3$  мм. Граница раздела между трансформаторным маслом и водой  $PT$  проходит ровно посередине расчетной области в вертикальном направлении. Тонкое твердое тело, изображающее сечение тонкого электрода-лезвия, помещено в масло.

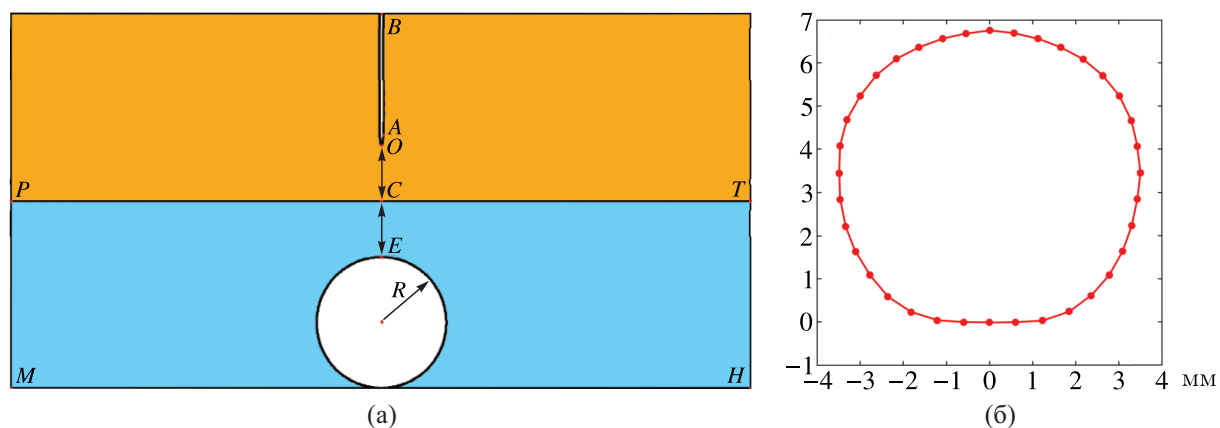


Рис. 2. Схема расчетной области (а), измеренное центральное сечение стального шарообразного электрода (б)

Электрод, помещенный в трансформаторное масло, представляет собой стальное лезвие толщиной 0,1 мм. На расстоянии 0,5 мм (точка А, рис. 2, а) от нижнего края лезвия его толщина уменьшается от 0,1 мм до радиуса скругления кончика лезвия (точка О, рис. 2, а), равного 0,005 мм.

Проблема нахождения напряженности поля в зависимости от разности потенциалов между электродами в системе электродов «электрод-лезвие – сфера» — это отдельная, довольно сложная задача электростатики, связанная с решением уравнения Пуассона. В связи с изменением формы контактной границы в идеальном случае необходимо делать пересчет электрического поля каждый шаг по времени. Однако в связи со сложной геометрией задачи на решение уравнения Пуассона итерационным методом тратится несоизмеримо большое количество времени, нежели на решение уравнений Навье – Стокса. В первом приближении на всем протяжении счета используется начальное поле напряженности электрического поля, полученное в начальный момент времени.

Существует множество специализированных пакетов, которые способны находить напряженность электрического поля по разности потенциалов между электродами. Большинство из



них являются, к сожалению, коммерческими. Одним из них является отечественная разработка Elcut student 6.4, которая позволяет использовать бесплатную ограниченную версию. Ограничение связано с не очень большим количеством расчетных ячеек для нахождения напряженности поля. Однако это ограничение можно обойти, если для разных зон расчетной области задавать ячейки различного размера (рис. 3). Для решения данной задачи этого достаточно, поскольку, во-первых, сгущения около электрода даже при таком измельчении сетки у электрода гидродинамическая сетка будут крупнее, а, во-вторых, вдали от электрода градиенты напряженности малы, и для расчета значений напряженности достаточно сетки со значительно более крупными ячейками.

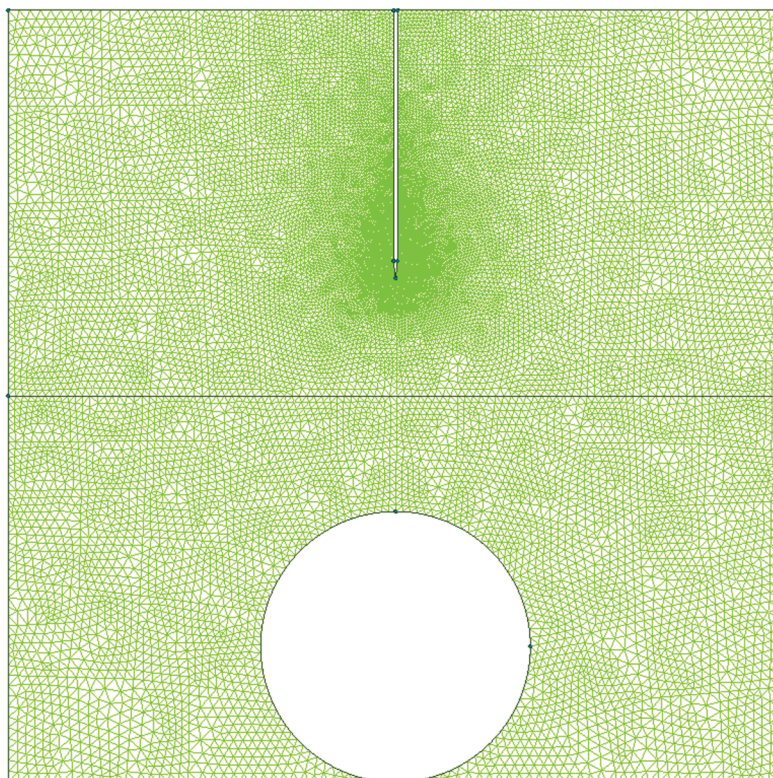


Рис. 3. Сгущающаяся у игольчатого электрода неструктурированная сетка для расчета напряженности электрического поля в программе Elcut student 6.4

На рис. 4 показана величина модуля напряженности электрического поля, рассчитанного в программе Elcut student 6.4 в плоскости осевой симметрии при разности потенциалов между электродами 2500 В. Далее значения компонент вектора напряженности электрического поля можно сохранить в файл на диск и загрузить его в программу гидродинамического расчета. При этом на основе сохраненного поля напряженности можно восстановить поле напряженности с количеством расчетных ячеек, равным количеству ячеек, используемых для гидродинамического расчета.

Электрод-лезвие, помещенный в масло, имеет положительный заряд. Круглый электрод, находящийся в воде, заземлен. Разность потенциалов между электродами обозначена как  $U$ . Электрическое поле в данной конфигурации электродов соответствует разности потенциалов между электродами 2500 В.

Расчеты начала развития неустойчивости и электрогидродинамического течения проводились для сеток  $100 \times 200$ ,  $200 \times 400$  и  $400 \times 800$  ячеек.

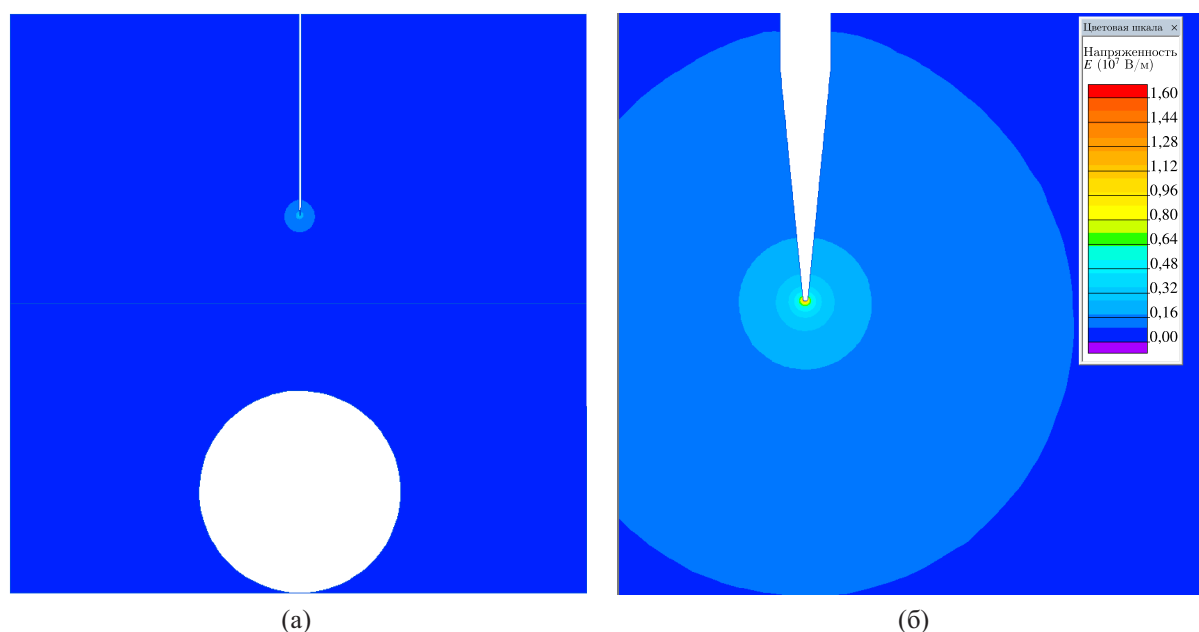


Рис. 4. Величина напряженности электрического поля в системе «электрод-лезвие – сфера» при разности потенциалов между электродами 2500 В: а) малый масштаб; б) большой масштаб

Вода и масло при моделировании рассматриваются как слабосжимаемые жидкости. Движение слабосжимаемых жидкостей описывается уравнениями Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta u + F_x, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \Delta v + \rho g + F_y, \tag{3}$$

$$\frac{dp}{d\rho} = \frac{1}{\rho\beta}. \tag{4}$$

Здесь  $\mathbf{V} = (u, v)^T$  – вектор скорости, компоненты которого  $u$  и  $v$  являются проекциями вектора скорости на оси  $Ox$  и  $Oy$  соответственно,  $p$  – давление,  $\rho$  – плотность жидкости,  $\beta$  – коэффициент искусственной сжимаемости,  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости,  $F_x$  и  $F_y$  – компоненты объемной внешней силы.

Внешнюю силу  $\vec{F} = \overrightarrow{(F_x, F_y)}$  можно представить в виде суммы двух сил, действующих непосредственно вблизи контактной поверхности двух жидкостей: одна из них является силой электрической природы [Ландау, Лифшиц, 2005], вторая является силой поверхностного натяжения:

$$\vec{F} = \vec{f}^e + \vec{f}^\sigma,$$

где  $\vec{f}^e = \nabla \left( \frac{\epsilon_0 E^2}{2} \rho \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T \right) - \frac{\epsilon_0 E^2}{2} \nabla \epsilon$  – пондеромоторная сила,  $\vec{f}^\sigma$  – сила поверхностного натяжения,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, а  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

Поскольку зависимость  $\epsilon(\rho_o)$  для трансформаторного масла является неизвестной, а также рассматриваются несжимаемые жидкости, было решено сосредоточиться на исследовании второго компонента силы. Исследования, связанные с течением диэлектрических жидкостей под

действием первой компоненты силы, можно найти в [Shneider, Pekker, 2013; Shneider, Pekker, 2015].

В допущении, что

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho}\right)_T = 0,$$

силу  $\vec{f}^e$  можно представить в виде

$$\vec{f}^e = -\frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \nabla \varepsilon, \quad (5)$$

или, расписывая покомпонентно,

$$f_x^e = -\frac{\varepsilon_0 (E_x^2 + E_y^2)}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x},$$

$$f_y^e = -\frac{\varepsilon_0 (E_x^2 + E_y^2)}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}.$$

Объемная сила поверхностного натяжения вблизи диффузной границы двух жидкостей, согласно [Brackbill, Kothe, Zemach, 1992], может быть записана как

$$\vec{f}^\sigma = \sigma k \nabla \varphi = -\sigma \left( \nabla \cdot \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) \nabla \varphi,$$

где  $k$  — кривизна поверхности раздела,  $\varphi$  — относительный объем одной из фаз,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения на границе «вода – трансформаторное масло».

В уравнениях (1)–(3) плотность  $\rho$  и вязкость  $\mu$ , а также диэлектрическая проницаемость в уравнении (5) при рассмотрении системы из двух фаз представлены в виде

$$\rho = \rho_w \varphi + \rho_o (1 - \varphi),$$

$$\mu = \mu_w \varphi + \mu_o (1 - \varphi),$$

$$\varepsilon = \varepsilon_w \varphi + \varepsilon_o (1 - \varphi),$$

где  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\varepsilon$  — плотность, динамическая вязкость и диэлектрическая проницаемость смеси;  $\rho_w$ ,  $\mu_w$ ,  $\varepsilon_w$  — плотность, динамическая вязкость и диэлектрическая проницаемость воды;  $\rho_o$ ,  $\mu_o$ ,  $\varepsilon_o$  — плотность, динамическая вязкость и диэлектрическая проницаемость трансформаторного масла.

Начальные и другие данные расчетной задачи, а также свойства жидкостей представлены в таблице 1.

Коэффициент искусственной сжимаемости был подобран таким образом, чтобы локальная скорость звука была значительно больше возникающих скоростей в объеме жидкости. Согласно формуле (4) и значению  $\beta$  из таблицы 1, локальная скорость звука  $c$  будет равна

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho\beta}} = 100 \text{ м/с},$$

что многократно превосходит характерные скорости движения жидкости порядка одного сантиметра в секунду.

Граничные условия на границе расчетной области представляют собой условие проскальзывания на скорости:

$$\left. \frac{\partial \vec{V}}{\partial \vec{n}} \right|_{\partial \Omega} = 0,$$

$$V_n \Big|_{\partial \Omega} = 0,$$



Таблица 1. Численные параметры расчетной задачи

Параметр	Значение
Опорное давление, $p_0$	$10^5$ Па
Плотность воды, $\rho_w$	1000 кг/м <sup>3</sup>
Плотность трансформаторного масла, $\rho_o$	834 кг/м <sup>3</sup>
Динамическая вязкость воды, $\mu_w$	0,001 Па с
Динамическая вязкость трансформаторного масла, $\mu_o$	0,006 Па с
Диэлектрическая проницаемость воды, $\varepsilon_w$	81,0
Диэлектрическая проницаемость трансформаторного масла, $\varepsilon_o$	2,5
Коэффициент поверхностного натяжения, $\sigma$	0,025 Н/м
Искусственный коэффициент сжимаемости, $\beta$	$1,0 \cdot 10^{-7}$ 1/Па
Конечное время вычислений, $T$	0,1 с
Шаг по времени, $dt$	$1,25 \cdot 10^{-8}$ с
Количество вычислительных ядер, $p$	до 256
Число выводов информации в файл на диск, $Npr$	100

где  $\partial\Omega$  – внешняя граница расчетной области  $\Omega$ ,  $\vec{n}$  – вектор, перпендикулярный к поверхности границы,  $V_n$  – компонента скорости, перпендикулярная к границе.

Метод численного расчета, используемый для моделирования вязкой жидкой среды, основан на явном методе МакКормака, имеющем второй порядок точности по времени и пространству. Этот метод хорошо зарекомендовал себя при решении гиперболических уравнений газовой гидродинамики. В этой задаче уравнения Навье – Стокса решаются с применением метода искусственной сжимаемости [Anderson, Tannehill, Pletcher, 2016]. При этом гиперболическая часть уравнений решается методом МакКормака [MacCormack, 1969], а параболическая часть – стандартным методом конечных разностей. В этом случае не возникает трудностей при решении уравнений несжимаемой среды. Степень сжимаемости представляет собой переменную величину, непосредственно влияющую на скорость распространения возмущений. Эта скорость должна быть больше возможных максимальных скоростей потока, возникающих в ходе моделирования.

В оригинальном методе на этапе предиктора конечные разности используются в формулировке «разность «вперед»», а на этапе корректора используются разности «назад». В данной работе применяется комбинация из 4 возможных вариантов. Первый вариант можно описать следующим образом: на этапе предиктора по направлениям  $Ox$  и  $Oy$  используются разности «вперед», а на этапе корректора по направлениям  $Ox$  и  $Oy$  используются разности «назад». Во втором варианте для оси  $Oy$  направления разностей «вперед» и «назад» на этапах предиктора и корректора меняются местами. В третьем варианте меняются местами направления разностей «вперед» и «назад» на этапах предиктора и корректора для оси  $Ox$ . И наконец, в четвертом варианте снова меняются местами направления конечных разностей для предиктора и корректора вдоль оси  $Oy$ . Далее эти шаги циклически сменяют друг друга с течением времени. Таким образом, сохраняется пространственная симметрия решения по обеим осям  $Ox$  и  $Oy$ .

Остановимся несколько подробнее на технике отслеживания контактной границы, поскольку она используется не только для визуального разделения двух фаз и сквозного счета смеси, но и для определения силы поверхностного натяжения. Для отслеживания контактной границы двух фаз в настоящей работе используется метод концентраций, суть которого заключается в том, что вводится еще одно скалярное поле – поле концентрации  $\varphi$ . В области, заполненной водой, значение  $\varphi$  принимается равным единице. Там, где находится трансформаторное масло, концентрация  $\varphi$  принимается равной нулю. Отличное от нуля и единицы значение  $\varphi$  в расчетной

ячейке означает то, что в ней содержатся обе жидкости. Таким образом, ячейки со значениями  $\varphi$  от нуля до единицы содержат поверхность раздела фаз, которая имеет ненулевую толщину.

Основным уравнением расчета изменения скаляра  $\varphi$  является уравнение для его переноса:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla(\vec{V}\varphi) = 0. \quad (6)$$

В настоящей работе уравнение переноса (6) решается обыкновенным конечно-разностным явным методом.

Расчетная программа распараллелена с использованием библиотеки OpenMP. Запуск производился на вычислительных ядрах в количестве 96 для сетки  $200 \times 400$  и до 256 на сетке  $400 \times 800$ .

## Результаты численных расчетов

При проведении эксперимента с разностью потенциалов между электродами, равной 2,5 кВ, были получены изображения растущей струи воды в толщу масла, представленные на рис. 5. Условия эксперимента представлены в разделе «Описание эксперимента» и соответствуют рис. 1. Хорошо заметно, что ширина основания конуса примерно равна диаметру шарообразного электрода, т. е.  $\approx 6$  мм (время 50 мс), и со временем растет, достигая величины  $\approx 9$  мм на момент времени 75 мс и  $\approx 10,5$  мм на момент времени 100 мс. По мере приближения вершины конуса к высоковольтному электроду эта вершина заостряется в связи с тем, что электрическое поле локализуется между вершиной и острием электрода. Пробой промежутка происходит при 125 мс.

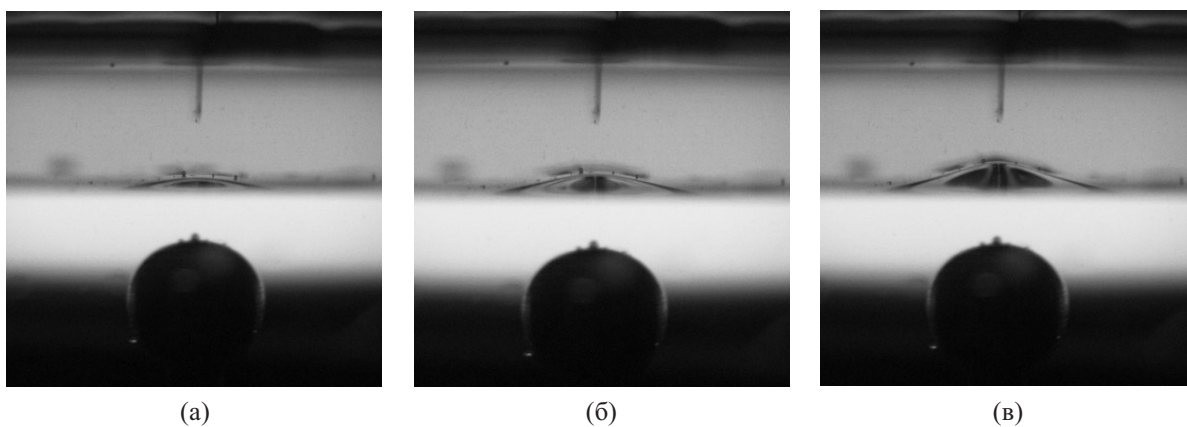


Рис. 5. Граница раздела фаз в момент времени 50 мс (а), 75 мс (б) и 100 мс (в) после начала действия вертикального электрического поля

В численном моделировании полный пересчет поля напряженности не происходит. Однако в области роста струи, между ее образующей и положением межфазовой границы в начальный момент времени, напряженность поля  $\vec{E}$  уменьшается в  $\frac{\epsilon_w}{\epsilon_o}$  раз. Поле напряженности электрического поля в течение расчета выглядит так, как схематично показано на рис. 6. Здесь белой окружностью отмечен круглый заземленный электрод.

На рис. 7 представлены кадры, полученные из численного эксперимента с расчетной сеткой размером  $400 \times 800$  ячеек. Белой окружностью отмечен круглый электрод в воде, белым тонким прямоугольником — высоковольтный электрод-лезвие, помещенный в масло. Ширина основания образующегося конуса воды несколько больше, полученного в эксперименте, и составляет  $\approx 11$  мм на момент времени 50 мс,  $\approx 12$  мм на момент времени 75 мс и  $\approx 12$  мм на

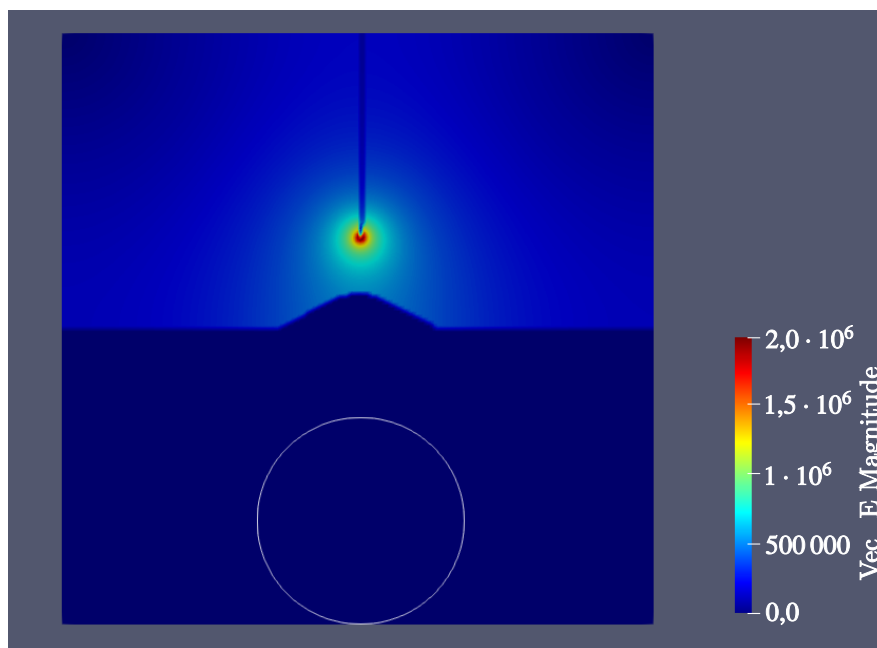


Рис. 6. Форма поверхности водно-масляного контакта и распределение модуля напряженности в жидкостях

момент времени 100 мс. Сама конусообразная форма струи воды прослеживается отчетливо, как и ее заострение с уменьшением расстояния между вершиной и электродом.

Рассматриваемые жидкости — несмешиваемые, диффузией на временах расчета можно пренебречь, поэтому контактная граница должна быть тонкой. Применяемый метод МакКормака обладает численной дисперсией и диссипацией, поэтому в расчете контактная граница становится относительно толстой, с толщиной 7–8 ячеек, при линейном размере ячейки 0,05 мм. Учет силы поверхностного натяжения с учетом «толстой» границы приводил к искаженной форме вытянутого конуса, поэтому в данных расчетах эта сила не учитывалась. Для расчета силы поверхностного натяжения требуется тонкая граница и уравнение (6) необходимо, по-видимому, решать донорно-акцепторным методом VOF (Volume Of Fluid) [Hirt, Nichols, 1981].

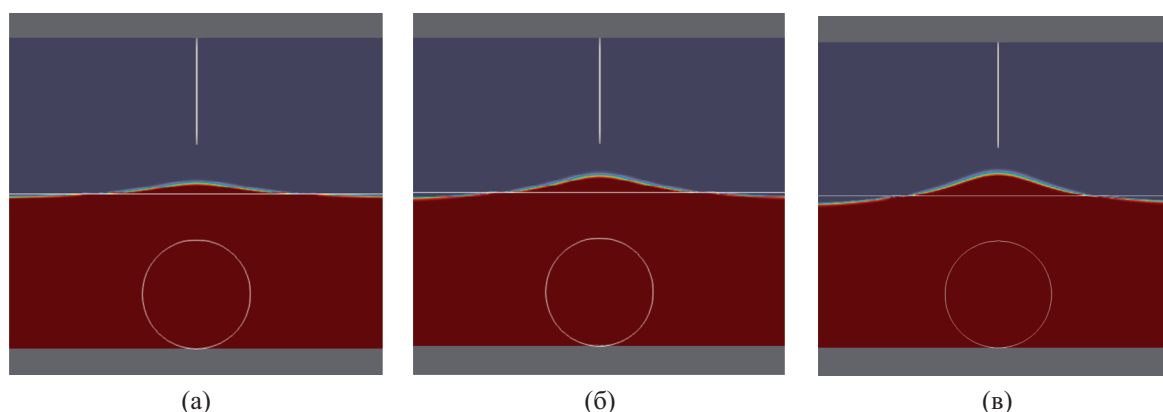


Рис. 7. Граница раздела фаз в момент времени 50 мс (а), 75 мс (б) и 100 мс (в) после начала расчета

На рис. 8 представлены размеры образующихся конусообразных струй воды, наблюдаемые в эксперименте и полученные в результате численного расчета. В последнем считается, что

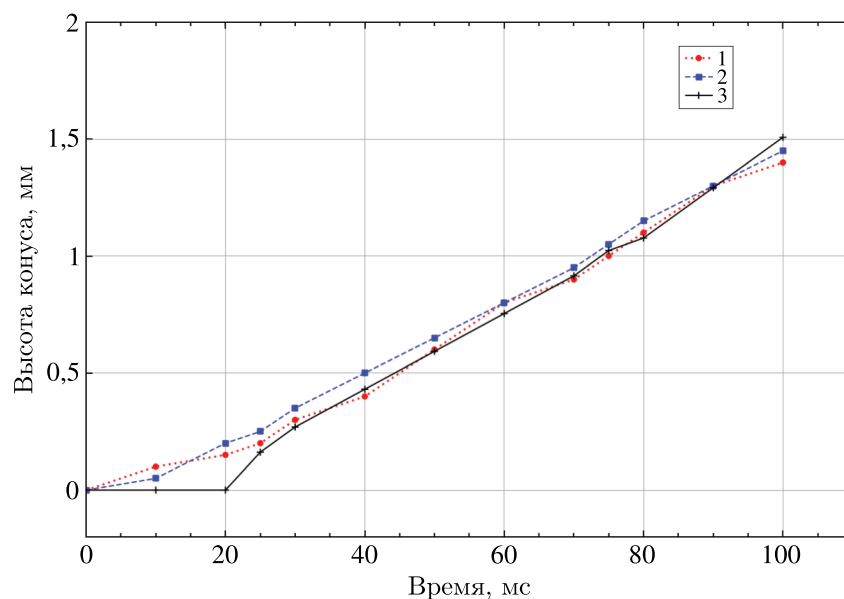


Рис. 8. Размер конусов воды: 1 — численный расчет на сетке  $200 \times 400$  ячеек, 2 — численный расчет на сетке  $400 \times 800$  ячеек, 3 — эксперимент

граница между фазами находится при значении  $\varphi = 0,5$ . То есть за положение контактной поверхности принимается та ячейка, значение  $\varphi$  в которой наиболее близко к величине 0,5. Из-за толщины контактной границы в 6–7 расчетных ячеек на сетке  $200 \times 400$  ячеек и 7–8 расчетных ячеек на сетке  $400 \times 800$  ячеек, при измерении высоты конуса точность составляет  $\pm 1$  расчетная ячейка или  $\pm 0,1$  мм для сетки  $200 \times 400$  ячеек и  $\pm 0,05$  мм для сетки  $400 \times 800$  ячеек.

При определении высоты конуса с использованием видеозаписи эксперимента в начальные моменты времени рост структуры не обнаруживается. Это связано с тем, что передний план находится не в зоне наведения фокуса камеры, сильно размыт и закрывает мелкие детали на заднем плане. Заметный рост конуса наблюдается с момента времени, равного 20 мс.

## Заключение

В настоящей работе приведены результаты натурального и численного эксперимента по наблюдению развития неустойчивости контактной поверхности двух слабопроводящих жидкостей с сильно отличающимися величинами диэлектрической проницаемости в электрическом поле. Прослежена динамика, когда струя жидкости с более высокой диэлектрической проницаемостью (воды) начинает расти в толще жидкости с более низкой диэлектрической проницаемостью (трансформаторного масла). Данный рост связан непосредственно с тем, что вблизи границы раздела двух жидкостей наблюдается скачок значения диэлектрической проницаемости, что при наличии сильного электрического поля вдоль направления скачка приводит к силе, действующей в этом же направлении и направленной в сторону меньшего значения диэлектрической проницаемости. При численном моделировании хорошо воспроизводятся как форма образующейся структуры в течение всего времени роста, так и время, затрачиваемое на преодоление струей расстояния до электрода в масле. Размер образующегося конуса линейно зависит от времени. Рост струи воды в сторону одного из электродов уменьшает электрическую прочность системы и может представлять угрозу для высоковольтного маслонеполненного оборудования при высоких рисках выпадения водного конденсата.

## Список литературы (References)

- 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: учебное пособие для вузов / под ред. М. В. Костенко. — М.: Высшая школа, 1973.
- Aleksandrov G. N., Ivanov V. L., Kadomskaya K. P., Kozyrev N. A., Kostenko M. V., Kuchinsky G. S., Polovoy I. F., Ryabov B. M., Hoberg V. A.* Tehnika vysokih naprjazhenij: uchebnoe posobie dlja vuzov [High voltage technology: textbook for universities] / pod redakciei M. V. Kostenko. — Moscow: Vysshaja shkola, 1973 (in Russian).
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Курс теоретической физики. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. — Издание 4-е. — М.: Физматлит, 2005. — С. 656.
- Landau L. D., Lifshic E. M.* Kurs teoreticheskoj fiziki. Vol. 8. Elektrodinamika sploshnyh sred [Course of theoretical physics. Vol. 8. Electrodynamics of continuous media]. — Izdanie 4-e. — Moscow: Fizmatlit, 2005. — P. 656 (in Russian).
- Anderson D., Tannehill J. C., Pletcher R. H.* Computational fluid mechanics and heat transfer. — 2016. — 740 p.
- Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C.* A continuum method for modeling surface tension // J. Comput. Phys. — 1992. — Vol. 100, No. 2. — P. 335–354.
- Fernández de la Mora J.* The fluid dynamics of Taylor cones // Annu. Rev. Fluid Mech. — 2007. — Vol. 39. — P. 217–243.
- Hirt C. W., Nichols B. D.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys. — 1981. — Vol. 39, No. 1. — P. 201–225.
- Loscertales I. G. et al.* Micro/nano encapsulation via electrified coaxial liquid jets // Science. — 2002. — Vol. 295, No. 5560. — P. 1695–1698.
- MacCormack R.* The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // AIAA Pap. — 1969. — Vol. 69. — P. 354.
- Macky W. A.* Some investigations on the deformation and breaking of water drops in strong electric fields // Proc. R. Soc. London. Ser. A, Contain. Pap. a Math. Phys. Character. — 1931. — Vol. 133, No. 822. — P. 565–587.
- Ramos A., Castellanos A.* Conical points in liquid–liquid interfaces subjected to electric fields // Phys. Lett. A. — 1994. — Vol. 184, No. 3. — P. 268–272.
- Rayleigh Lord F. R. S.* XX. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity // London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci. — 1882. — Vol. 14, No. 87. — P. 184–186.
- Shneider M. N., Pekker M.* Dielectric fluid in inhomogeneous pulsed electric field // Phys. Rev. E. Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys. — 2013. — Vol. 87, No. 4.
- Shneider M. N., Pekker M.* Pre-breakdown processes in a dielectric fluid in inhomogeneous pulsed electric fields // J. Appl. Phys. — 2015. — Vol. 117, No. 22.
- Sun C., Ohodnicki P. R., Stewart E. M.* Chemical sensing strategies for real-time monitoring of transformer oil: a review // IEEE Sens. J. — 2017. — Vol. 17, No. 18. — P. 5786–5806.
- Suvorov V. G., Zubarev N. M.* Formation of the Taylor cone on the surface of liquid metal in the presence of an electric field // J. Phys. D. Appl. Phys. — 2004. — Vol. 37, No. 2. P. 289–297.