

УДК 532.5, 537.39
 EDN: VTHMIB

PACS: 68.03.Hj

Определение напряженности электрического поля в трансформаторном масле с помощью микрокапель воды

© 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 24.03.2025; после доработки 11.04.2025; принята к публикации 11.08.2025
Шифр научной специальности 1.3.9*

Экспериментальное определение напряженности импульсного электрического поля в жидком диэлектрике может быть затруднительно, когда требуется минимизировать вносимое измерением возмущение. Оптический метод, основанный на эффекте Керра, применим при достаточно высоких напряженностях. В качестве альтернативного решения могут выступать введенные микрокапли воды, дробление которых в электрическом поле определяется его амплитудой и наступает при электрическом капиллярном числе $Ca_E \geq 0,2$. Проведены экспериментальное и расчетно-теоретическое исследования для капель одного размера, которые показали потенциальную применимость данного способа. Обсуждается влияние глубины резкости оптической системы и начального заряда капель на точность измерений.

Ключевые слова: электрическое поле; напряженность; измерение; микрокапли; вода; электрическое капиллярное число.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-4-30-36

Введение

До основополагающей работы Тейлора были распространены представления о том, что капли жидкости, погруженные в другую несмешивающуюся жидкость, ведут себя как идеальный диэлектрик, и что воздействие электрического поля на них всегда приводит к вытянутой деформации (удлинению вдоль направления электрического поля) поверхности [1]. Эта концепция получила название электрогидростатической модели, в которой силы электростатической природы действуют только по нормали к межфазной границе. Позже было обнаружено [2], что не все диэлектрические жидкости подвержены удлинению вдоль направления электрического поля и, вопреки электрогидростатической модели, некоторые из них демонстрируют сплюснутую деформацию (удлинение перпендикулярно

направлению приложенного электрического поля). На основе этих экспериментов Тейлор разработал модель диэлектрика с малой проводимостью, полагая, что наличие у жидкости ненулевой проводимости допускает протекание электрического тока небольшой величины через себя, и это приводит к накоплению свободного заряда на границе жидкость-жидкость [3, 4].

В диэлектрике с малой проводимостью взаимодействие этого свободного заряда с электрическим полем приводит к созданию электрических сил, направленных по касательной к границе, в дополнение к нормальным напряжениям. Поскольку в стационарном случае тангенциально направленные силы должны быть скомпенсированы, Тейлор пришел к выводу о существовании завихренного гидродинамического течения, что позднее было подтверждено экспериментально. Теория

Тейлора достаточно хорошо предсказывает небольшую деформацию капле эмульсии при течении Стокса. Более поздние экспериментальные и теоретические исследования [5] поведения капле в постоянном и переменном электрическом поле показали, что теория Тейлора занижает величину деформации для большинства рассмотренных случаев, хотя форма деформации, наблюдаемая в экспериментах, хорошо согласуется с предсказаниями Тейлора. В дальнейших публикациях [6] модель Тейлора была улучшена, что позволило рассчитать деформацию капле до приближения второго порядка.

Исследования позволили выделить ряд характерных параметров, определяющих эволюцию капле. Для капле радиусом a , находящейся под действием невозмущенного внешнего электрического поля напряженностью E , характерная скорость U определяется как $U = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{out}} E^2 a / \mu_{\text{out}}$, индексы «in» и «out» относятся к жидкостям капле и окружающей среды, соответственно, ε – диэлектрическая проницаемость, μ – динамическая вязкость. Динамика деформации капле зависит от безразмерных параметров, основанных на свойствах жидкости, таких как отношение проводимостей $R = \sigma_{\text{in}} / \sigma_{\text{out}}$, отношение диэлектрических проницаемостей $S = \varepsilon_{\text{in}} / \varepsilon_{\text{out}}$ и отношение вязкостей $M = \mu_{\text{in}} / \mu_{\text{out}}$ между внутренней и внешней жидкостями. Процедура обезразмеривания приводит к другим безразмерным параметрам, таким как число Рейнольдса потока Re , электрическое число Рейнольдса Re_E и электрическое капиллярное число Ca_E . Число Re представляет собой отношение инерционных сил к вязким и выражается математически как $Re = \rho_{\text{out}} a U / \mu_{\text{out}}$, где ρ_{out} – плотность внешней жидкости. Модель Тейлора работает только для течения с малым числом Рейнольдса $Re \leq O(1)$ и, соответственно, для малых размеров капле. Число, равное отношению вязкой силы к инерционной силе и поверхностному натяжению определяет переходные режимы деформации, такие как монотонный и колебательный, и называется числом Онезорге: $Oh = \mu_{\text{in}} / (\rho_{\text{in}} \gamma a)^{0,5}$, где γ – коэффициент поверхностного натяжения между двумя жидкостями. Электрическое капиллярное число есть отношение между величиной электрических напряжений εE^2 и капиллярными напряжени-

ями γ/a , оно определяет режимы деформации капле (устойчивая и неустойчивая деформация): $Ca_E = \mu_{\text{out}} U / \gamma = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{out}} E^2 a / \gamma$. Электрическое число Рейнольдса определяется как отношение характерного времени релаксации заряда $t_c = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{out}} / \sigma_{\text{out}}$ ко времени переноса заряда течением $t_h = \mu_{\text{out}} / (\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{out}} E^2)$. Малое значение электрического числа Рейнольдса Re_E свидетельствует о том, что эффекты конвекции заряда пренебрежимо малы. В зависимости от свойств среды, Re_E определяется как $Re_E = t_c / t_h = \varepsilon_0^2 \varepsilon_2^2 E^2 / \mu_2 \sigma_2$. Другим важным безразмерным числом является число Сэвилла Sa , которое представляет собой отношение электрического числа Рейнольдса к электрическому капиллярному числу и определяет переходы между режимами распада капле: $Sa = Re_E / Ca_E$. Для условий настоящих исследований рассмотренные выше числа лежат в следующих диапазонах: $Re = (0,01-0,1)$, $Re_E = (10^4-10^5)$, $Oh = 0,035$, $Ca_E = (0,05-1)$.

Ниже определенного критического капиллярного числа проводящая капле, таким образом, достигает устойчивой формы, и наблюдается отсутствие течений в капле и окружающей среде. По мере увеличения капиллярного числа выше критического, электрическое напряжение на капле увеличивается до тех пор, пока поверхностное натяжение перестанет уравнивать электрическое напряжение, что приводит к разрыву капле. Тейлор рассчитал критическое капиллярное число [7], которое составило около 0,2, используя приближение сфероидальной капле. Несколько экспериментальных [8], аналитических [6, 9] и численных [10–14] исследований подтверждают, что критическое Ca_E составляет около $0,2 \pm 0,02$.

Цель настоящей работы состоит в установлении возможности использования микрокапеле воды для определения величины напряженности электрического поля в отдельных точках разрядного промежутка в трансформаторном масле.

Экспериментальная установка

На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки для исследования деформации и разрушения капле полярной жидкости (воды) под действием электричес-

кого поля. В емкость T в форме прямого параллелепипеда с прозрачными стенками налиты две несмешивающихся жидкости (вода W снизу и трансформаторное масло O сверху). В воду с электропроводностью 300 мкСм/см погружен закругленный электрод $E1$, который через измерительный резистор R_s (сопротивлением 25 Ом) соединен с заземлением, а в масло – заостренный электрод $E2$, к которому при помощи полупроводникового высоковольтного ключа S подводится напряжение с запасующего конденсатора C , который заряжается через балластный резистор R_b (1 МОм) от высоковольтного источника положительного напряжения до напряжения $+20 \text{ кВ}$. Для того, чтобы ограничить ток в электрической цепи, в схему введен резистор R_1 сопротивлением 5 кОм . При подаче низковольтного импульса с цифрового генератора G на управляющий вход ключа S последний коммутирует высокое напряжение на электрод $E2$. В отсутствие синхроимпульса ключ соединяет электрод $E2$ с землей через ограничивающий ток резистор R_g сопротивлением 50 Ом . Это обеспечивает отсутствие накопления заряда в области подачи высокого напряжения до момента начала эксперимента. Характеристики полупроводникового ключа таковы, что фронт нарастания напряжения составляет величину около $0,1 \text{ мкс}$, а фронт спада – также $0,1 \text{ мкс}$.

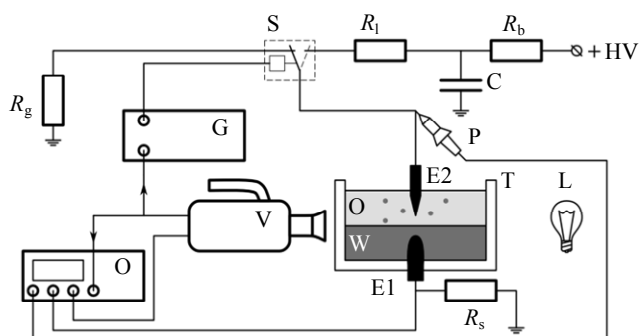


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: O – осциллограф, V – камера, T – разрядная ячейка, $E1$, $E2$ – пара электродов, L – источник света, G – генератор импульсов, P – пробник напряжения, HV – высоковольтный источник, S – полупроводниковый высоковольтный ключ, R_s – токовый шунт, R_g – защитное сопротивление ключа, R_1 – токоограничительное сопротивление, R_b – балластное сопротивление, C – ударная емкость

Для создания капель воды в масле проводится предварительный запуск с такой длительностью приложения высокого напряжения

к электроду $E2$, чтобы между электродами смог сформироваться электрический разряд по механизму, описанному в [15]. В этом случае между электродами формируется быстро расширяющаяся область горячего газа (плазмы), приводящая к быстрой деформации и разрушению границы раздела жидкостей с формированием капель одной жидкости в другой (на рисунке точками показаны капли воды в масле). Поскольку плотности жидкостей близки, а вязкость их относительно велика, взвешенные капли одной жидкости в другой существуют значительное время, характерное время их перемещения значительно больше, чем время приложения напряжения. Это дает возможность провести следующий эксперимент в течение нескольких десятков секунд после момента создания капель.

Для визуализации процесса деформации и разрушения капель используется скоростная цифровая видеокамера V и фоновая подсветка емкости T с помощью лампы накаливания L . Для измерения электрических параметров процесса используется осциллограф O , высоковольтный пробник $1:1000 P$, токовый шунт R_s . Для синхронизации во времени визуализации и измерения сигнал REC_READY , соответствующий началу съемки кинограммы, с видеокамеры V подается одновременно на осциллограф для его запуска и на вход генератора G , который через заранее установленную задержку во времени управляет ключом S . Дополнительно на один из каналов осциллографа подается сигнал видеокамеры F_SYNC , соответствующий моментам времени экспозиции кадров кинограммы. Длительность времени подачи высокого напряжения на электрод $E2$ составляет $0,4 \text{ мс}$, что меньше времени, необходимого для развития разряда между электродами.

Математическая модель

Подробное описание постановки задачи для моделирования дано в работе [16]. Здесь приведем только основные геометрические параметры модели. Распределение электрического поля рассчитывается в цилиндрической системе координат, ось которой совпадает с осью электродной системы. Размер расчетной области в радиальном направлении составляет 40 мм . Расстояние от острия электрода, погруженного в масло, до межфазной границы

составляет 3 мм, общая толщина масляного слоя составляет 15 мм, расстояние от поверхности штыревого электрода до межфазной границы составляет также 3 мм. Диаметр цилиндрической части заостренного электрода составляет 1 мм, цилиндрического электрода – 1,8 мм. Радиус скругления вершины иглы составляет 70 мкм. Параметры воды и масла, используемые в расчетах: плотность 1000 и 980 кг/м³, динамическая вязкость $8,9 \times 10^{-4}$ и $2,36 \times 10^{-2}$, диэлектрическая проницаемость 80 и 2, электропроводность 300 мкСм/см и 1 пСм/см, коэффициент поверхностного натяжения между водой и маслом 24,7 мН/м.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 даны фотографии разрядного промежутка, сделанные с экспозицией 17 мкс в моменты времени 0 и 400 мкс, на которых отмечены капли, за которыми ведется наблюдение. Красным цветом выделены те из них, которые разрушаются на отдельные более мелкие капли (11 шт.), синим – капли со слабой деформацией и без разрушения (19 шт.), розовым – капли без видимой деформации (7 шт.). Общим для капель, обозначенных красным цветом, является их близость либо к высоковольтному электроду, либо к границе раздела сред, потенциал которой близок к потенциалу штыревого электрода за счет относительно высокой проводимости воды. Розовые капли лежат на периферии области наблюдения, а синие – занимают промежуточное положение. Часть капель обладают резко видимой границей, что указывает на их положение в плоскости фокусировки оптической системы и позволяет достоверно определить их размер. Изображения других отмеченных капель имеют размытую границу, эти капли находятся вне плоскости фокусировки, и об их размере можно судить лишь приближенно. Среднее значение диаметра всех выбранных капель составляет около 50 мкм.

Для всех идентифицированных капель было рассчитано электрическое капиллярное число Ca_E (рис. 3). Результаты представлены с разбивкой на три выше обозначенные группы, внутри каждой из которых точки отсортированы по увеличению Ca_E . Отдельно взятые значения Ca_E не всегда удовлетворяют критерию дробления $Ca_E \geq 0,2$. Существуют капли,

которые не испытывают дробления при $Ca_E \geq 0,2$, а также капли, которые наоборот – дробятся при $Ca_E < 0,2$.

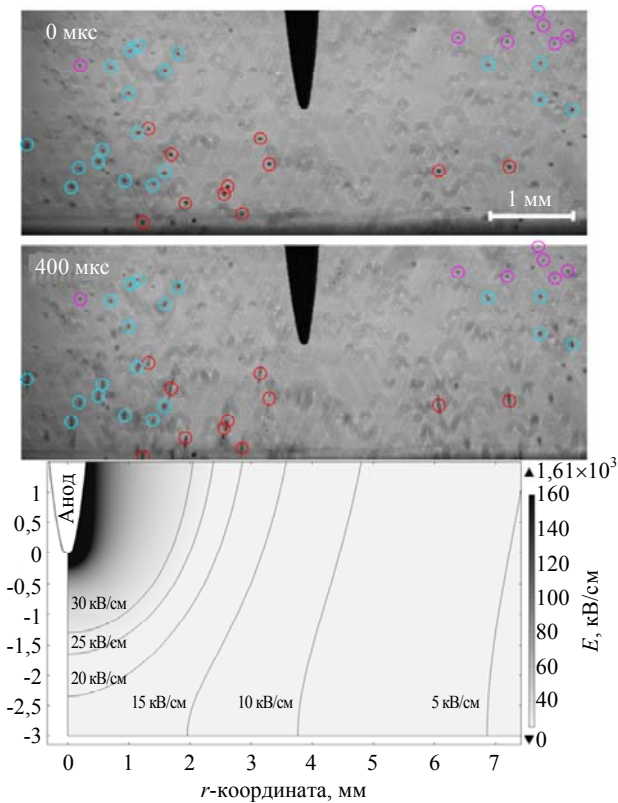


Рис. 2. Деформация и распыление капель воды, взвешенных в масле, под действием импульса напряжения амплитудой 20 кВ и длительностью 400 мкс (моменты времени 0 и 400 мкс). Красными окружностями отмечены капли с дроблением, синими – с заметной деформацией, розовыми – без заметной деформации

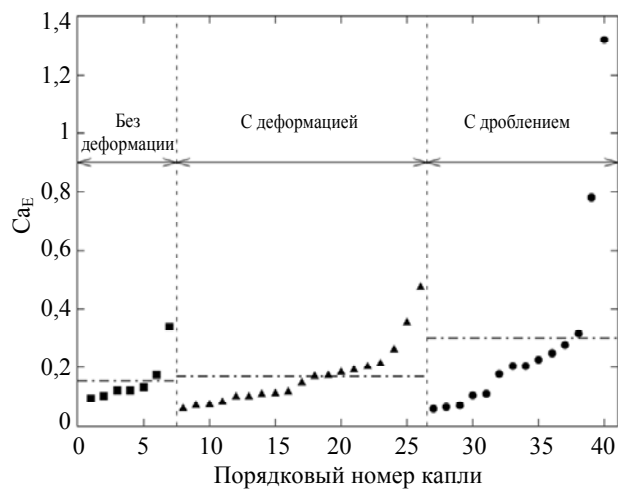


Рис. 3. Электрическое капиллярное число Ca_E для капель, идентифицированных на рисунке 2. Вертикальные пунктирные линии разграничивают группы капель «без деформации», «с деформацией» и «с дроблением». Горизонтальные штрих-пунктирные линии обозначают среднюю величину Ca_E в группе

Горизонтальная черта в каждой группе представляет среднее значение Ca_E : 0,15, 0,17 и 0,30. Средние значения лучше соответствуют литературным данным относительно критической величины: при значениях, меньших, чем 0,2 (т. е. 0,15 и 0,17), наблюдается лишь деформация или полное отсутствие отклика капли на воздействие поля; а при значении 0,30 наблюдается дробление капель.

Наиболее вероятное объяснение несоответствия деформации некоторых капель величине рассчитанного Ca_E состоит в следующих обстоятельствах. Во-первых, используемый в качестве объектива камеры микроскоп имеет значительную глубину резкости при заданном увеличении (рис. 4). Вид зависимости d/d_0 от расстояния между каплями и плоскостью фокусировки L говорит о том, что видимый диаметр капель d будет слабо меняться относительно истинного ее диаметра d_0 при отклонении положения капли от плоскости фокусировки на $L = 1$ мм.

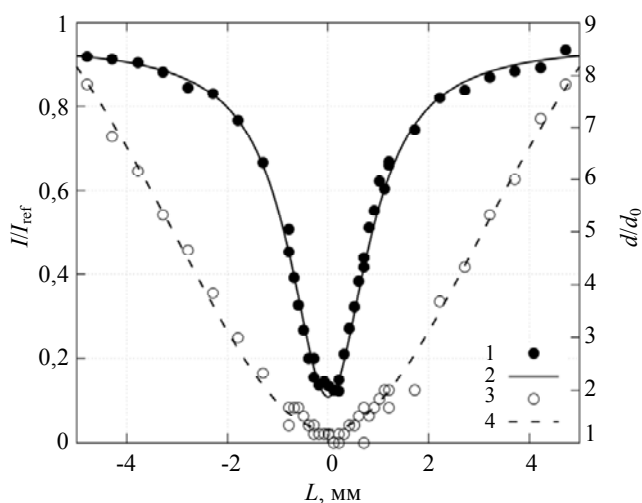


Рис. 4. Экспериментально измеренные зависимости относительной интенсивности изображений капель (I/I_{ref} , «1») и их относительного видимого диаметра (d/d_0 , «3»), а также их соответствующие аппроксимации функцией Лоренца («2» и «4»)

Такое относительно небольшое отклонение L может, тем не менее, приводить к значительным изменениям величины напряженности, взятой для расчета Ca_E для видимого центра капли, ввиду особенности конфигурации сильно неоднородного поля – от острия. Этим объясняется деформация без дробления капель, для которых расчетное число $>0,2$. Второе обстоятельство заключается в элект-

рическом заряде капель, который они могут приобретать, если рождаются с границы раздела в электрическом поле. Оценим вклад поверхностного заряда в критерий дробления капели по электрическому капиллярному числу Ca_E . Для этого рассмотрим распад заряженной капли без внешнего электрического поля. Потеря устойчивости и дробление происходят при числе $f = E_c/(2E_s) \geq 1$, где E_c и E_s – энергия заряженной сферы и поверхностная энергия капли соответственно, которые можно выразить как $E_c = Q^2/(8\pi\epsilon_0 a)$, $E_s = 4\pi\gamma a^2$. После подстановки в формулу для f имеем: $f = Q^2/(64\pi^2\epsilon_0 a^4) \geq \gamma/a$. Рассматривая теперь случай заряженной капли во внешнем электрическом поле, объединяем полученное условие с условием $Ca_E \geq 0,2$:

$$Q^2 / (64\pi^2\epsilon_0 a^4) + 5\epsilon_0\epsilon_{oil}E^2 \geq \gamma/a. \quad (1)$$

Для практической применимости полученного выражения оценим величину заряда капли, образованной в результате отрыва от границы раздела вода-масло. Будем считать, что поверхностная плотность зарядов капли перед отрывом и поверхности, от которой она отрывается, равны. Зная величину напряженности электрического поля E_n на оси электродов вблизи поверхности, полученную в результате численного моделирования (рис. 2), можно оценить поверхностную плотность заряда как $\sigma = \epsilon_0 E_n$. Тогда выражение (1) приобретет следующий вид:

$$1 / (4\epsilon_0 E_n^2) + 5\epsilon_0\epsilon_{oil}E^2 \geq \gamma/a. \quad (2)$$

Такая поправка дает вклад от 10 % до 20 % в критерий дробления по капиллярному электрическому числу и объясняет дробление капель, для которых вычисленное $Ca_E < 0,2$.

Выводы

При увеличении напряженности электрического поля происходит деформация проводящей капли, в результате чего она приобретает форму сфероида, большая ось которого ориентирована в направлении вектора электрического. Эта деформация может быть как устойчивой, так и неустойчивой. Конкретная реализация одного из видов деформации

определяется значением электрического капиллярного числа. Если капиллярное число для капли $Ca_E < 0,2$, то деформация является устойчивой. При превышении порогового значения Ca_E , деформация капли будет неустойчивой, и её дальнейший распад будет также зависеть от параметров, описанных выше: соотношения проводимостей, диэлектрических проницаемостей, динамических вязкостей, а также числа Сэвилла.

Экспериментальные результаты показывают, что средние значения электрического капиллярного числа, взятые по группам капель, не испытавших заметную деформацию, испытавших заметную деформацию, а также подвергшихся распаду, коррелируют с литературными данными о критической величине, равной 0,2. Данное обстоятельство может быть использовано на практике для оценки величины напряженности электрического и её распределения в межэлектродном промежутке при известных величинах диаметра капель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O'Konski C. T., Thacher H. C. / The Journal of Physical Chemistry. 1953. Vol. 57. № 9. P. 955–958.
2. Allan R., Mason S. / Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1962. Vol. 267. № 1328. P. 62–76.
3. Taylor G. I. / Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1966. Vol. 291. № 1425. P. 159–166.
4. Melcher J. R., Taylor G. I. / Annual Review of Fluid Mechanics. 1969. Vol. 1. № 1. P. 111–146.
5. Torza S., Cox R. G., Mason S. G. / Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1971. Vol. 269. № 1198. P. 295–319.
6. Ajayi O. O. / Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences. 1978. Vol. 364. № 1719. P. 499–507.
7. Wilson C. T. R., Taylor G. I. / Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1925. Vol. 22. № 5. P. 728–730.
8. Ha J.-W., Yang S.-M. / Journal of Fluid Mechanics. 2000. Vol. 405. P. 131–156.
9. Taylor G. / Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1964. Vol. 280. № 1382. P. 383–397.
10. Miksis M. J. / The Physics of Fluids. 1981. Vol. 24. № 11. P. 1967–1972.
11. Sherwood J. D. / Journal of Fluid Mechanics. 1988. Vol. 188. P. 133–146.
12. Basaran O. A., Scriven L. E. / Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1989. Vol. 1. № 5. P. 799–809.
13. Feng J. Q., Scott T. C. / Journal of Fluid Mechanics. 1996. Vol. 311. № 1. P. 289.
14. Dubash N., Mestel A. J. / Physics of Fluids. 2007. Vol. 19. № 7.
15. Панов В. А., Куликов Ю. М., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Савельев А. С. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 5–10.
16. Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М. / Прикладная физика. 2025. № 2. С. 5–11.

PACS: 68.03.Hj

Electric field strength measurements in transformer oil using microdroplets of 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 24.03.2025; revised 11.04.2025; accepted 11.08.2025

Experimental determination of the pulsed electric field strength in a liquid dielectric can be difficult when it is necessary to minimize the disturbance introduced by the measurement. The optical method based on the Kerr effect is applicable at sufficiently high strengths. An alternative solution can be water microdroplets introduced into the gap, the fragmentation of which in the electric field is determined by its amplitude and occurs at an electric capillary number $Ca_E \geq 0.2$. Experimental and theoretical studies for droplets of the same size have been conducted, which have shown the potential applicability of this method. The influence of the

depth of field of the optical system and the initial charge of the droplets on the accuracy of measurements is discussed.

Keywords: electric field; intensity; measurement; microdroplets; water; electric capillary number.

REFERENCES

1. O’Konski C. T. and Thacher H. C., *The Journal of Physical Chemistry* **57** (9), 955–958 (1953).
2. Allan R. and Mason S., *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* **267** (1328), 62–76 (1962).
3. Taylor G. I., *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* **291** (1425), 159–166 (1966).
4. Melcher J. R. and Taylor G. I., *Annual Review of Fluid Mechanics* **1** (1), 111–146 (1969).
5. Torza S., Cox R. G. and Mason S. G., *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* **269** (1198), 295–319 (1971).
6. Ajayi O. O., *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences* **364** (1719), 499–507 (1978).
7. Wilson C. T. R. and Taylor G. I., *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **22** (5), 728–730 (1925).
8. Ha J.-W. and Yang S.-M., *Journal of Fluid Mechanics* **405**, 131–156 (2000).
9. Taylor G., *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* **280** (1382), 383–397 (1964).
10. Miksis M. J., *The Physics of Fluids* **24** (11), 1967–1972 (1981).
11. Sherwood J. D., *Journal of Fluid Mechanics* **188**, 133–146 (1988).
12. Basaran O. A. and Scriven L. E., *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* **1** (5), 799–809 (1989).
13. Feng J. Q. and Scott T. C., *Journal of Fluid Mechanics* **311** (1), 289 (1996).
14. Dubash N. and Mestel A. J., *Physics of Fluids* **19** (7), (2007).
15. Panov V. A., Kulikov Yu. M., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Saveliev A. S., *Applied Physics*, № 6, 5–10 (2023) [in Russian].
16. Panov V. A., Saveliev A. S. and Kulikov Yu. M., *Applied Physics*, № 2, 5–11 (2025) [in Russian].

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 РИНЦ 5821-2776, Author ID 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 РИНЦ 6888-7369, Author ID 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 РИНЦ 7719-8459, Author ID 1130937