

УДК 532.5, 537.39

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-87-94

EDN: APOITY

PACS: 68.03.Hj



Деформация диэлектрической капли в воде под действием микросекундных импульсов тока

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

Методом Particle Image Velocimetry (PIV) исследована нестационарная картина обтекания капли диэлектрической жидкости дибутилфталата окружающей водой слабой проводимости под действием импульса тока микросекундной длительности. Обнаружено, что время существования индуцированного завихренного течения в воде значительно превышает длительность импульса тока. Во время действия импульса тока на поверхности капли развиваются только малые возмущения, в то время как конечные возмущения поверхности развиваются на значительно больших временах, превосходящих длительность импульса тока на два и более порядка, и связаны с эволюцией течения воды вокруг капли. Показано, что на величину максимальной скорости в индуцированном течении воды влияет потенциал иглы при неизменной длительности и амплитуде импульса тока.

Ключевые слова: вода, жидкий диэлектрик, дибутилфталат, капля, ЭГД-течения, PIV.

Введение

Исследования поведения диэлектрических жидкостей в электрическом поле начались еще в XVIII веке с изобретения Кунаусом конденсатора [1]. На протяжении длительного времени исследования влияния электрических полей на диэлектрические жидкости были сосредоточены главным образом на изучении прочности диэлектрика на пробой при высоких электрических полях и зависимости диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков от частоты электромагнитных волн [2–4]. Эксперименты по пробое диэлек-

трических жидкостей в неоднородных импульсных электрических полях микросекундной и наносекундной длительности показали, что пробой происходит при более низких напряжениях по сравнению с постоянным полем и по разным механизмам. В первом случае он связан с омическим нагревом жидкости воды с последующим образованием пузырьков в области высокого напряжения. Во втором случае пробой объясняется беспузырьковым механизмом за счет возникновения кавитационных разрывов, создаваемых отрицательным давлением под воздействием электрострикционных сил [5]. Однако, интенсивное исследование электрогидродинамических свойств жидкостей, таких как физика процессов, происходящих в жидкостях под влиянием электрического поля [6–8], управление гидродинамическими процессами и процессами теплообмена с помощью электрического поля [9–12], созданию новых технических устройств – ЭГД-насосов, преобразователей, сепараторов [6, 13–15], электродиспергирование жидкостей [16–19], физика молний, проблема электризации гидрометеоров [20–23] началось только в 60-х годах прошлого столетия. Электростатические технологии в насто-

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

E-mail: panovvladislav@gmail.com

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

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 12.07.2023

После доработки 24.07.2023

Принята к публикации 31.07.2023

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

ящее время хорошо известны и нашли широкое применение в таких областях, как изготовление тонких нитей и капилляров [24], электростатическая покраска [25] и улавливание пыли [19, 26] а также струйная печать [27].

Экспериментальная установка

Для исследования развития возмущения поверхности раздела двух жидкостей, вызванного токовым импульсом, использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. В емкость (1) размерами $8 \times 8 \times 8 \text{ см}^3$ с прозрачными стенками наливалась вода (2) слабой проводимости ($< 5 \text{ мкСм/см}$). В воду сверху погружалась медицинская игла из нержавеющей стали (3) с внешним диаметром 0,85 мм и внутренним диаметром 0,53 мм, через которую с помощью шприца (4) выдавливалась диэлектрическая жидкость (дибутилфталат (ДБФ), плотность $1,05 \text{ кг/м}^3$) для формирования капли (5) диэлектрической жидкости в воде. Вследствие смачиваемости поверхности иглы и вследствие примерного равенства плотности воды и ДБФ капля неподвижно располагалась в воде, благодаря чему ее контуры могли быть сфотографированы на цифровую видеокамеру через

микроскоп при освещении либо задней фоновой подсветкой, либо с помощью боковой подсветкой с помощью лазерного ножа.

Внизу емкости располагался металлический электрод (6) с большой площадью поверхности (по сравнению с площадью погруженной в воду части трубки) для сбора заряда, протекающего через воду при подаче высокого напряжения на иглу. Подача высокого напряжения на иглу (3) осуществлялась через высоковольтный полупроводниковый ключ (7), управляемый внешним синхроимпульсом, создаваемым программируемым генератором импульсов BNC575 (8). Второй полупроводниковый ключ (9) соединял нижний электрод 6 с заземлением при подаче входного низковольтного напряжения с генератора 8. Время, через которое ключи 8 и 9 открываются после подачи на их вход прямоугольного импульса, составляют величину менее 1 мкс. Напряжение на игле измеряется с помощью высоковольтного пробника 1:1000 (10) Tektronix P-6015A, сигнал которого подается на осциллограф LeCroy HD4000. Также на другие каналы осциллографа подаются сигналы с генератора импульсов 8 и со скоростной цифровой видео-камеры Phantom, с помощью которой проводилась фоторегистрация процесса в плоскости, изображенной на рис. 1.

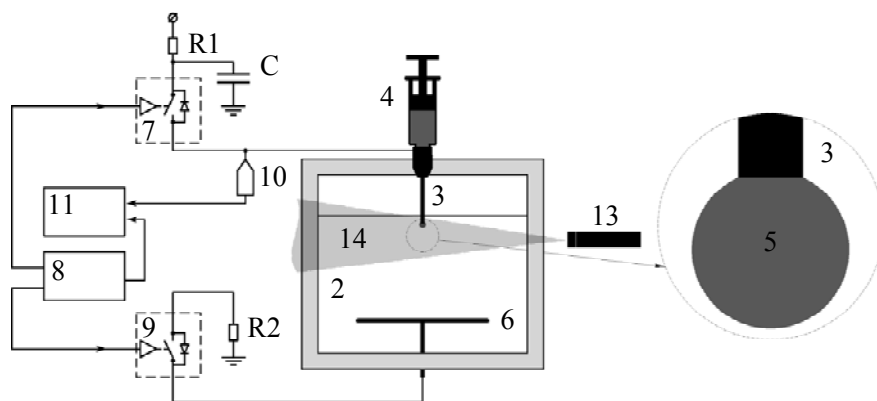


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – диэлектрическая ячейка с прозрачными стенками; 2 – вода; 3 – игла; 4 – шприц с дибутилфталатом; 5 – капля дибутилфталата; 6 – нижний электрод; 7 – высоковольтный ключи № 1; 8 – генератор синхроимпульсов; 9 – высоковольтный ключ № 2; 10 – высоковольтный пробник; 11 – осциллограф; 12 – подвод высокого напряжения; 13 – лазер с формирующей оптикой

Высокое напряжение создавалось с помощью высоковольтного источника Spellman и подавалось на клемму, обозначенную номером 12 на схеме. При подаче положительного импульса на ключ 7 на игле возникал высокий положительный потенциал (до 10 кВ), при этом если на ключ 9 также подавался управляющий импульс, то в цепи начинал течь ток. Конденсатор С использовался для обеспечения постоянного потенциала на игле при переключениях ключей. Номиналы резисторов R1 и R2 подбирались таким образом, чтобы ограничить ток, протекающий через ключи, величиной, предельной для данных устройств. Следует отметить, что сопротивление воды между иглой 3 и нижним электродом 4 в эксперименте было на порядок выше, чем величина (R1 + R2).

Возмущение поверхности капли с последующей визуализацией его развития проводилось двумя способами, которые далее будут называться «с полем» и «без поля». В начальный момент времени конденсатор С заряжен до необходимого напряжения, при этом ключ 7 открыт, т. е. на игле присутствует положительный потенциал, а ключ 9 закрыт, то есть ток в цепи отсутствует. В этот же момент времени ключ 9 открывается, и через воду начинает течь ток величиной порядка 1 мА, вызывая течение воды. Через время t_1 , которое далее будет называться «время возмущения», возможно два варианта управления ключами. Первый, «с полем», заключается в закрытии ключа 9, тогда электрический ток в воде прекращается, но на игле сохраняется электрический потенциал ($t_U \gg t_1$), где t_U – время действия высокого потенциала на электроде). Второй, «без поля», заключается в закрытии ключа 7, тогда и электрический ток, и потенциал иглы быстро становятся равными нулю ($t_U = t_1$).

Для визуализации и измерения параметров течения вблизи поверхности капли диэлектрической жидкости применялся метод трассировки частиц PIV (Particle Image Velocimetry), позволяющий определить скорость течения прозрачной жидкости. Для реализации метода использовались: монохромная

скоростная цифровая видеокамера Phantom с микроскопом МБС-10 в качестве объектива, постоянный лазер (CW DPSS 532 нм 1 Вт) вместе с оптической системой (13), формирующей лазерный нож (14). Для определения скорости вблизи капли использовались частицы оксида титана с размером около 1 мкм, которые равномерно распределялись по объему воды. Съемка проводилась со скоростью 10000 к/с при разрешении 1280×800 пикселей, при этом размер видимой области составлял 8,7×5,4 мм².

Экспериментальные результаты и обсуждение

Эксперименты проведены для четырех вариантов постановки:

- а) без капли ДБФ, воздействие током «без поля», т. е. длительность t_U действия высокого потенциала на игле совпадает с длительностью t_1 токового импульса ($t_U = t_1$);
- б) без капли ДБФ, «с полем» ($t_U \gg t_1$);
- в) с каплей ДБФ диаметром $d_0 \approx 1,5$ мм на конце иглы, «без поля» ($t_U = t_1$);
- г) с каплей ДБФ диаметром $d_0 \approx 1,5$ мм на конце иглы, «с полем» ($t_U \gg t_1$).

Результаты, представленные ниже, получены при напряжении 10 кВ и длительности токового импульса 20 мкс. В результате каждого эксперимента получена видеозапись, которая затем была обработана.

Поля скорости и завихренности возникающего течения

На рис. 2 представлены обработанные фотографии возникающих течений. На каждом изображении фоном является исходная монохромная фотография, затем наложено поле завихренности $\nabla \times \mathbf{V}$ (цветной слой, от синего к красному, где синий – завихренность против часовой стрелки, красный – по часовой, выше яркость цвета – выше амплитуда), затем – поле скорости \mathbf{V} в виде векторов. Длина и цвет вектора скорости обозначают её величину.

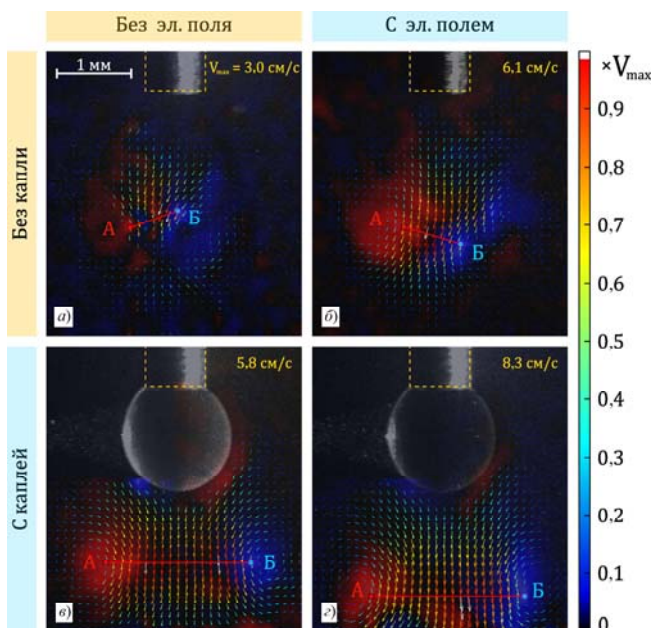


Рис. 2. Двумерное поле скорости и завихренность течения, возникающего в слабопроводящей воде ($< 5 \text{ мкСм/см}$) под воздействием протекания импульсного электрического тока длительностью 20 мкс и напряжении на игле 10 кВ к моменту времени 40 мс в четырех случаях: а) конец иглы открыт в воду (без капли ДБФ), длительность t_U действия высокого потенциала на игле совпадает с длительностью t_I токового импульса ($t_U = t_I$); б) то же, что и (а), но $t_U \gg t_I$; в) на конце иглы находится капля ДБФ, $t_U = t_I$; г) то же, что и (в), но $t_U \gg t_I$. Максимальная скорость V_{max} в течении указана в правом верхнем углу. Стрелками указано направление течения в точке. Цвет и длина стрелки соответствуют величине скорости. Цветовая шкала справа дана в долях от V_{max} . Изменение цвета фонового изображения (от синего до красного) соответствует величине завихренности течения, где ярко красный – максимум завихренности по часовой стрелке (точка А), ярко синий – максимум завихренности против часовой стрелки (точка Б). Пунктиром в верхней части обозначен контур иглы

Из графиков зависимости максимальной скорости течения под иглой (каплей) видно, что при прочих равных условиях наличие поля увеличивает скорость течения (рис. 3). При этом формируется тороидальный вихрь, распространяющийся в направлении индуцированного движения воды. При рассмотрении полей распределения компонент вектора скорости оказывается, что качественно можно заключить, что объем воды в индуцированном движении, больше в случае, когда наложено поле. В виду того, что в сравниваемых случаях скорости движения разные, то корректнее сравнивать расстояние между центрами вих-

рей, которые видны в плоскости лазерного ножа (плоскости изображения). Для этого целесообразно рассчитать поле завихренности (если точнее – z -компоненту вектора завихренности), где в центре вихря наблюдается максимальная (по модулю) ее величина. Расстояние между центрами вихрей можно рассматривать как объем вовлеченной в движение жидкости. Видно, что в момент времени 40 мс после токового импульса центры вихрей находятся на $0,3 \text{ мм}$ ниже по потоку в случае, когда поле наложено. В этот же момент времени расстояние между центрами вихрей в случае с полем составляет $2,07 \text{ мм}$, а без поля – $1,97 \text{ мм}$ (между точками А и Б на рис. 2). Для случая без поля центры вихрей достигают того же уровня по высоте к моменту времени около 50 мс . Кроме того, величина завихренности в ядре вихря при прочих равных условиях больше, когда поле наложено. Данное обстоятельство связано, прежде всего, с величиной скорости, которая заметно выше в случае с полем.

Максимальная скорость в течении

График на рис. 3 дает представление о величине максимальной скорости в течении по мере его развития для четырех рассматриваемых случаев (с каплей, без капли, с полем, без поля). Общим для всех зависимостей является нарастание максимальной скорости на начальном участке времени. Это связано с отходом тороидального вихря вниз от электрода и освобождением прохода к оси для жидкости,двигающейся вдоль боковой поверхности иглы к её рабочему концу. Дополнительное её ускорение возможно за счет протекания через образовавшийся узкий канал между кромкой иглы и ядром отошедшего вихря с отбором энергии вихревого движения. Самый короткий участок такого роста скорости – до 6 мс , наблюдается в случае без капли и без поля ($t_U = t_I$). В остальных трех случаях рост происходит до 10 мс . На участке после максимума наблюдается практически монотонный спад максимальной скорости, которая теперь локализована в ядре образовавшейся свободной струи, за счет расширения зоны перемешивания вокруг неё. Замедление спада скорости на участке от 18 до 30 мс совпадает с фазой об-

ратного сжатия капли после её достижения максимального удлинения (рис. 4). Излом, наблюдаемый на кривых (б) и (з) около 30–32 мс, совпадает с моментом затухания торoidalного вихря, который продвигался вниз от

электрода. Более выраженный спад скорости на участке кривой (з) от 30 до 40 мс совпадает с движением деформированной капли обратно к электроду, что несколько тормозит движение.

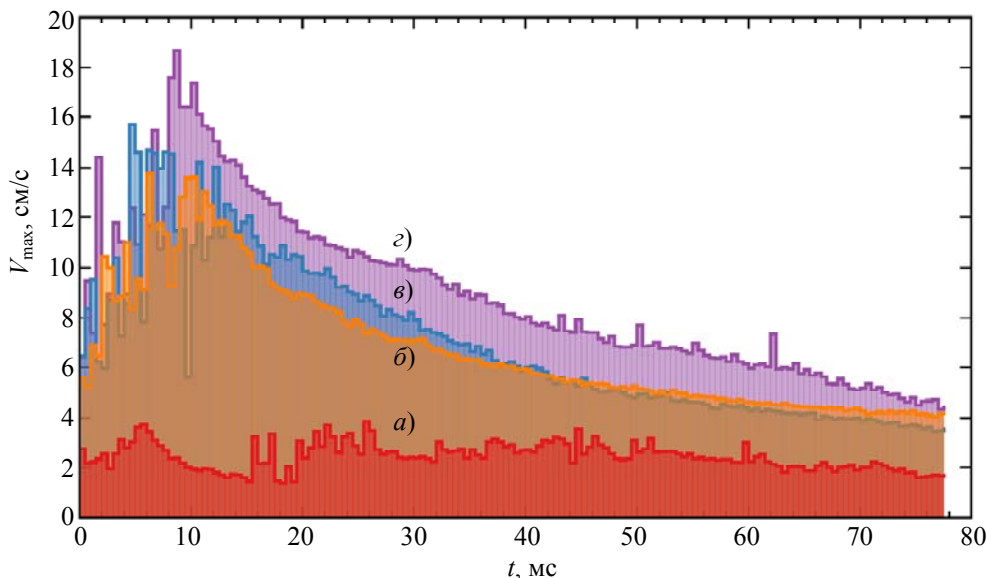


Рис. 3. Максимальная скорость в течении в зависимости от времени после его инициации действием импульсного тока ($U = 10$ кВ, $t_I = 20$ мкс) в экспериментах, указанных на рис. 2: а) без капли ДБФ, $t_U = t_I$; б) то же, что и (а), но $t_U \gg t_I$; в) на конце иглы находится капля ДБФ, $t_U = t_I$; з) то же, что и (в), но $t_U \gg t_I$

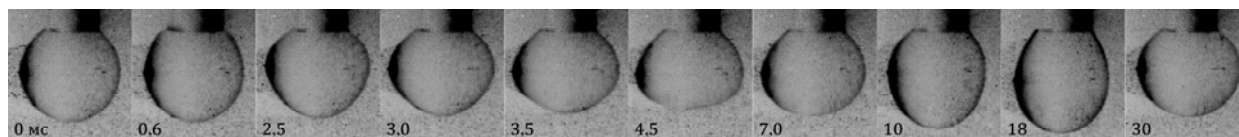


Рис. 4. Деформация капли ДБФ в случае воздействия импульсом тока «с полем» ($U = 10$ кВ, $t_I = 20$ мкс, $t_U \gg t_I$). Диаметр невозмущенной капли по экватору $d_0 = 1,5$ мм. Время кадра указано в левом нижнем углу в миллисекундах (негативы фотографий)

Деформация капли

В начальный момент времени невозмущенная капля имеет форму, близкую к сферической (рис. 4). Её горизонтальный размер («по экватору») несколько больше вертикального из-за сравнимого диаметра иглы. Деформация капли в момент подачи токового импульса сосредоточена вблизи кромки иглы. Наблюдается образование короткой цилиндрической «ножки», которой капля держится на игле. Часть пространства у кромки иглы, занимаемая ДБФ, при этом уменьшается. По-видимому, вода, обладающая большей диэлектрической проницаемостью, устремляется в область более высокой напряженности электрического поля у кромки

иглы, вытесняя оттуда ДБФ. Этим объясняется образование на капле «бортика» к моменту около 0,6 мс из объема ДБФ (рис. 4), оттесненного водой от кромки иглы. Диаметр капли по экватору в этот момент уменьшается на несколько процентов. После этого начинается фаза сильной деформации капли на временах, значительно превышающих длительность токового импульса. Максимальный диаметр по экватору равный $1,05 d_0$ достигается к моменту времени 3 мс. Максимальное сжатие по длине капли на 17 % достигается к 5 мс, максимальное растяжение на 12 % – к 17,5 мс. Дальнейшее возвращение капли к исходному состоянию происходит через затухающие колебания (сжатие-растяжение).

В случае воздействия токовым импульсом «без поля» ($t_U = t_I$), описанный выше процесс полностью повторяется, но с меньшими амплитудами деформаций.

Заключение

Воздействие импульсных токов под действием высокого напряжения, подаваемого на высоковольтный электрод (иглу), приводит к возникновению течения слабопроводящей воды в окрестности высоковольтного электрода. На структуру и скорость возникающего течения оказывают влияние соотношение длительностей импульса тока и действия высокого потенциала на электроде, а также наличие (отсутствие) другой диэлектрической жидкости в виде капли на конце высоковольтного электрода-иглы. Без капли дибутилфталата действие импульса тока приводит к возникновению течения в воде со скоростями несколько единиц см/с, локализованного в области под электродом, характерный размер которой совпадает с диаметром электрода. В случае, когда высокий потенциал сохраняется на электроде после действия импульса тока, максимальная скорость возникающего течения увеличивается до уровня 10 см/с, а его структура при этом не меняется. Наличие капли дибутилфталата влияет как на структуру течения в воде, так и на максимальную скорость, которая возрастает до значений более 10 см/с, а в течении образуется большой тороидальный вихрь, ось которого совпадает с осью электрода-иглы. Расстояние между максимумами завихренности в возникающем вихре против и по часовой стрелке примерно в 1,5 и 2 раза превышает диаметр капли и иглы соответственно. Таким образом, в течение вовлечен значительно больший объем воды по сравнению с течением без капли. Сохранение высокого потенциала на электроде после импульса тока в этом случае увеличивает максимальную скорость еще на несколько см/с. Малые возмущения ближайшего к электроду участка поверхности капли ДБФ при протекании импульса тока могут возникать вследствие втягивания воды, обладающей более высокой диэлектрической проницаемостью, в область с более высокой напряженностью электрического поля около иглы.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Melcher J. R., Taylor G. I.* / Annual Review of Fluid Mechanics. 1969. Vol. 1. № 1. P. 111.
2. *Hasted J. B.* Liquid water: Dielectric properties The Physics and Physical Chemistry of Water – Springer New York, 1972.
3. *Fernández D. P., Mulev Y., Goodwin A. R. H., Sengers J. M. H. L.* / Journal of Physical and Chemical Reference Data. 1995. Vol. 24. № 1. P. 33.
4. *Kaatze U.* / Journal of Chemical & Engineering Data. 1989. Vol. 34. № 4. P. 371.
5. *Shneider M. N., Pekker M.* Liquid Dielectrics in an Inhomogeneous Pulsed Electric Field – Institute of Physics Publishing, 2019.
6. *Стишков Ю. К., Остапенко А. А.* Электродинамические течения в жидких диэлектриках. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.
7. *Остроумов Г. А.* Взаимодействие электрических и гидродинамических полей: Физические основы электрогидродинамики. – М.: Наука, 1979.
8. *Жакин А. И.* / УФН. 2013. Т. 183. № 2. С. 153.
9. *Болога М. К., Гросу Ф. П., Кожухарь И. А.* Электроконвекция и теплообмен. – Кишинев: Штиинца, 1977.
10. *Болога М. К., Смирнов Г. Ф., Дидковский А. Б., Климов С. М.* Теплообмен при кипении и конденсации в электрическом поле. – Кишинев: Штиинца, 1987.
11. *Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Непомнящий А. А.* Устойчивость конвективных течений. – М.: Наука, 1989.
12. *Брискман В. А., Саранин В. А.* О возможности управления процессами теплообмена в условиях невесомости с помощью электрического поля. Гидродинамика и теплообмен в невесомости. – М.: Наука, 1982.
13. *Рубашов И. Б., Бортников Ю. С.* Электрогазодинамика. – М.: Атомиздат, 1971.
14. *Ватажин А. Б., Грабовский В. И., Лихтер В. А., Шульгин В. И.* Электрогазодинамические течения. – М.: Наука, 1983.
15. *Верещага А. Н., Тарунин Е. Л.* / Моделирование в механике. 1989. Т. 3. № 20. С. 111.
16. *Коженков В. И., Фукс Н. А.* / Успехи химии. 1976. Т. 45. № 12. С. 2274.
17. *Ширяева С. О., Григорьев А. И., Святченко А. А.* Классификация режимов работы электрогидродинамических источников жидко-капельных пучков. Препринт № 25. – Ярославль: Институт микроэлектроники, 1993.
18. *Григорьев А. И., Ширяева С. О.* / Известия РАН. МЖГ. 1994. № 3. С. 3.
19. *Верещагин И. П.* Основы электродинамики дисперсных систем. — М.: Энергия, 1974.

20. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. – Л.: Гидрометеоздат, 1961.
21. Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозное электричество. – М.: ГИТТЛ, 1954.
22. Мучник В. М., Фишман Б. Е. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. – Л.: Гидрометеоздат, 1982.
23. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. – Л.: Гидрометеоздат, 1974.
24. Дружинин Э. А. Производство и свойства фильтрующих материалов из ультратонких полимерных волокон ФП. – М.: ИздАТ, 2007.
25. Melcher J. R. Continuum Electromechanics. – Cambridge, Mass.: MIT Press, 1981.
26. Kim S., Jung M., Choi S., Lee J., Lim J., Kim M. / Experimental Thermal and Fluid Science. 2020. Vol. 118. P. 110151.
27. Безруков В. И. Основы электрокаплеструйных технологий. – СПб.: Судостроение, 2001.

PACS: 68.03.Hj

Deformation of a dielectric drop in water under microsecond current pulses

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

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

Received 12.07.2023; revised 24.07.2023; accepted 31.07.2023

Particle Image Velocimetry (PIV) is used to study the nonstationary flow pattern around a drop of a dielectric liquid of dibutyl phthalate surrounding water of weak conductivity under the action of a microsecond current pulse. It has been found that the time of existence of the induced vortex flow in water significantly exceeds the duration of the current pulse. During the action of the pulse, only small perturbations develop on the surface of the drop, while the final perturbations of the surface develop at much longer times, exceeding the duration of the current pulse by two or more orders of magnitude, and are associated with the evolution of the water flow around the drop. It is shown that the value of the maximum velocity in the induced water flow is affected by the potential of the needle at a constant duration and amplitude of the current.

Keywords: water, liquid dielectric, dibutylphthalate, drop, EHD flows, PIV.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-87-94

REFERENCES

- Melcher J. R. and Taylor G. I., Annual Review of Fluid Mechanics **1**, 111 (1969).
- Hasted J. B., Liquid water: Dielectric properties The Physics and Physical Chemistry of Water, New York, Springer, 1972.
- Fernández D. P., Mulev Y., Goodwin A. R. H. and Sengers J. M. H. L., Journal of Physical and Chemical Reference Data **24**, 33 (1995).
- Kaatze U., Journal of Chemical & Engineering Data **34**, 371 (1989).
- Shneider M. N. and Pekker M., Liquid Dielectrics in an Inhomogeneous Pulsed Electric Field, Institute of Physics Publishing, 2019.
- Stishkov Yu. K. and Ostapenko A. A., Elektrodinamicheskie techeniya v zhidkih dielektrikah, L., Izd-vo LGU, 1989 [in Russian].
- Ostroumov G. A., Vzaimodejstvie elektricheskikh i gidrodinamicheskikh polej: Fizicheskie osnovy elektrogidrodinamiki, Moscow, Nauka, 1979 [in Russian].

8. Zhakin A. I., Phys. Usp. **56**, 141 (2013).
9. Bologa M. K., Grosu F. P. and Kozhuhar' I. A., Elektrokonvekciya i teploobmen, Kishinev, Shtiinca, 1977 [in Russian].
10. Bologa M. K., Smirnov G. F., Didkovskij A. B. and Klimov S. M., Teploobmen pri kipenii i kondensacii v elektricheskom pole, Kishinev, Shtiinca, 1987 [in Russian].
11. Gershuni G. Z., Zhuhovickij E. M. and Nepomnyashchij A. A., Ustojchivost' konvektivnyh techenij, Moscow, Nauka, 1989 [in Russian].
12. Briskman V. A. and Saranin V. A., O vozmozhnosti upravleniya processami teplomassoobmena v usloviyah nevesomosti s pomoshch'yu elektricheskogo polya. Gidrodinamika i teplomassoobmen v nevesomosti, Moscow, Nauka, 1982 [in Russian].
13. Rubashov I. B. and Bortnikov Yu. S., Elektrogazodinamika, Moscow, Atomizdat, 1971 [in Russian].
14. Vatazhin A. B., Grabovskij V. I., Lihter V. A. and Shul'gin V. I., Elektrogazodinamicheskie techeniya, Moscow, Nauka, 1983 [in Russian].
15. A. N. Vereshchaga, E. L. Tarunin, Modelirovanie v mekhanike, **3** (20), 111 (1989) [in Russian]
16. V. I. Kozhenkov, N. A. Fuks, Uspekhi himii, **45**, 2274 (1976) [in Russian]
17. Shiryayeva S. O., Grigor'ev A. I. and Svyatchenko A. A., Klassifikaciya rezhimov raboty elektrogidrodinamicheskikh istochnikov zhidko-kapel'nyh puchkov. Preprint № 25, Yaroslavl', Institut mikroelektroniki, 1993 [in Russian].
18. Grigor'ev A. I. and Shiryayeva S. O., Izvestiya RAN. MZHG **3**, 3 (1994) [in Russian].
19. Vereshchagin I. P., Osnovy elektrodinamiki dispersnyh system, Moscow, Energiya, 1974 [in Russian].
20. Mejson B. Dzh., Fizika oblakov, L., Gidrometeoizdat, 1961 [in Russian].
21. Shishkin N. S., Oblaka, osadki i grozovoe elektrichestvo, Moscow, GITTL, 1954 [in Russian].
22. Muchnik V. M. and Fishman B. E., Elektrizaciya grubodispersnyh aerozolej v atmosphere, L., Gidrometeoizdat, 1982) [in Russian].
23. Chalmers Dzh. A., Atmosfernoe elektrichestvo, L., Gidrometeoizdat, 1974 [in Russian].
24. Druzhinin E. A., Proizvodstvo i svoystva fil'truyushchih materialov iz ul'tratonkih polimernyh volokon FP, Moscow, IzdAT, 2007 [in Russian].
25. Melcher J. R., Continuum Electromechanics, Cambridge, Mass., MIT Press, 1981.
26. Kim S., Jung M., Choi S., Lee J., Lim J. and Kim M., Experimental Thermal and Fluid Science **118**, 110151 (2020).
27. Bezrukov V. I., Osnovy elektrokaplestrujnyh tekhnologij, SPb., Sudostroenie, 2001 [in Russian].