

03.4

Разрушение эмульсий „вода в масле“ при воздействии неоднородного переменного электрического поля

© Э.С. Батыршин, А.И. Муллаянов[¶], С.П. Саметов

Центр микро-, наномасштабной динамики дисперсных систем, Башкирский государственный университет, Уфа, Россия

[¶] E-mail: mullayanovalmir@mail.ru

Поступило в Редакцию 10 декабря 2019 г.

В окончательной редакции 10 декабря 2019 г.

Принято к публикации 12 декабря 2019 г.

Представлен экспериментальный подход с использованием методов микрофлюидики, оптической микроскопии и высокоскоростной видеосъемки для изучения разрушения эмульсий типа „вода в масле“ при воздействии неоднородного переменного электрического поля. Сделаны количественные оценки параметров, характеризующих динамику разрушения эмульсии. Метод может быть использован при разработке эффективных способов разрушения водонефтяных эмульсий, в том числе в комбинации с другими методами воздействия: химическими, акустическими, термическими и др.

Ключевые слова: эмульсия, электрическое поле, электрокоалесценция, оптическая микроскопия, высокоскоростная видеосъемка.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.05.49111.18149

Изучение поведения микрокапель воды, взвешенных в масляной фазе, под действием электрического поля находится в области активных исследований — как экспериментальных, так и теоретических. Несмотря на то что первые работы в этой области появились достаточно давно [1], указанная задача актуальна до сих пор. Данные исследования мотивированы решением различных задач практической направленности. Одна из таких проблем связана с нефтяной промышленностью, а именно с задачей разрушения водонефтяных эмульсий [2–4]. Существует несколько технологических методов разрушения указанных эмульсий [5]. Наряду с такими методами, как центрифугирование, нагрев, фильтрация и др., важным и перспективным является метод, основанный на воздействии на эмульсии электрическим полем [6,7]. При воздействии электрического поля капли эмульсии приходят в движение, образуя в некоторых случаях агрегаты. Если напряженность электрического поля в этом случае будет достаточно велика, то после соприкосновения оболочка капель в области контакта может быть дестабилизирована, и произойдет слияние (коалесценция) капель. Стимулированную таким образом с помощью электрического поля коалесценцию называют электрокоалесценцией [6].

Также в настоящее время происходит бурное развитие экспериментальных методов микрофлюидики, в которых электрическое поле используется для управления микрообъектами дисперсных систем [8,9]. Кроме различных манипуляций микрообъектами электрическое поле может применяться для изменения их структуры, например для управляемого дробления или слияния капель. Безусловным преимуществом технологий микрофлюидики является возможность детального изучения процессов, происходящих в дисперсных системах на микро- и наномасштабах.

В настоящей работе использованы технологические решения, применяемые в микрофлюидике для изучения процессов в эмульсиях при воздействии неоднородного электрического поля. Основной целью работы является изучение динамики разрушения эмульсии при воздействии неоднородного переменного электрического поля. В качестве объекта исследования выбрана эмульсия типа „вода в масле“, состоящая из микрокапель воды размером 1–10 μm , взвешенных в тетрадекане. Деионизированная вода, очищенная системой Milli-Q Advantage A10 (EMD Millipore), эмульгировалась в тетрадекане Ч (Реахим) с помощью лабораторного гомогенизатора LabGEN 125 (Cole-Parmer). Для стабилизации эмульсии в тетрадекане предварительно был растворен неионогенный сурфактант — сорбитан моноолеат (SPAN 80, Sigma-Aldrich) в весовой концентрации 0.5%. Для изучения воздействия электрического поля на эмульсию была изготовлена ячейка, которая представляла собой сэндвич, образованный двумя прозрачными стеклянными подложками. На внутренней поверхности нижней подложки была сформирована система остроконечных электродов с расстоянием порядка 200 μm между вершинами. Для изготовления подложки с электродами использовалась стеклянная пластина с оптически прозрачным поверхностным электропроводящим слоем ИТО (indium tin oxide — оксид индия-олова). Electroды формировались при помощи методов фотолитографии. Для предотвращения нежелательных электрохимических процессов в приэлектродной области поверхность электродов была покрыта изолирующим слоем полиимида. Геометрия электродов обеспечивала сильно неоднородное электрическое поле внутри микроканала. Стеклянные подложки отделены друг от друга тефлоновыми прокладками толщиной 100 μm , которые формировали

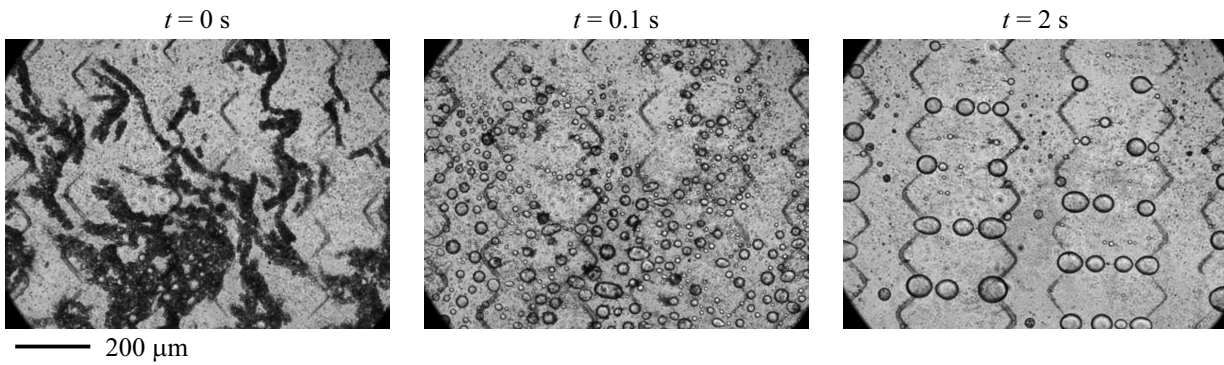


Рис. 1. Разрушение эмульсии при воздействии электрического поля (частота $f = 100$ Hz, амплитуда напряжения $U_{pp} = 150$ V).

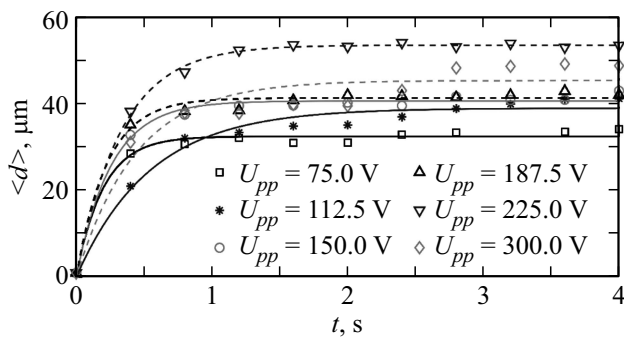


Рис. 2. Зависимость среднего размера капель $\langle d \rangle$ от времени воздействия электрического поля (частота поля $f = 100$ Hz).

микроканал прямоугольного сечения. Ячейка герметизировалась по периметру с помощью эпоксидного состава и имела входное и выходное отверстия для заполнения. Ячейка размещалась на предметном столике оптического микроскопа IX71 (Olympus). Высокоскоростная съемка производилась при помощи камеры FASTCAM SA5 (Photron). На систему электродов в микроканале подавалось переменное двуполярное напряжение от генератора сигналов произвольной формы 33522A (Agilent Technologies), усиленное с помощью усилителя Tabor 9200 (Tabor Electronics Ltd.). Максимальная амплитуда (пик–пик) приложенного напряжения составляла 300 V, а соответствующая величина напряженности электрического поля достигала значений $\sim 10^6$ V/m. Частота напряжения варьировалась в диапазоне 100–1000 Hz. Регистрация изображений производилась со скоростью 250 кадров в секунду с пространственным разрешением 1024×1024 точек, в каждой точке интенсивность дискретизировалась по 256 уровням серого цвета.

На рис. 1 показана последовательность изображений эмульсии при воздействии электрического поля. В начальный момент времени мы имеем высокодисперсную эмульсию, состоящую из очень мелких капель ($1 \mu\text{m}$ и менее). Темные области на начальном изображении представляют собой скопления капель. На последующих изображениях видно, что капли локализуются в обла-

стях между остриями электродов, где происходит их активное слияние, в результате чего количество мелких капель уменьшается и образуется небольшое количество крупных капель, размер которых достигает десятков микрометров. Эти капли выстраиваются в цепочки между электродами и периодически деформируются с частотой, зависящей от частоты приложенного поля. Именно неоднородность электрического поля приводит к миграции капель в локальные области, где электрическое поле максимально, тем самым интенсифицируется разрушение эмульсии. Преобразование огромного количества мелких капель в небольшое число крупных в конечном счете и является главной целью электрокоалесценции, поскольку крупные капли легко отделяются от масляной фазы в результате гравитационного осаждения.

Характеристика интенсивности разрушения эмульсии при воздействии электрического поля проводилась на основе обработки изображений, которая осуществлялась с помощью программы цифровой обработки изображений ImageJ [10]. Указанная программа позволяет автоматически находить в изображениях капли, аппроксимировать их окружностями или эллипсами и определять их размеры. Таким образом, были обработаны изображения видеоряда при разрушении эмульсии. Для разделения эмульсий представляют интерес только капли, размер которых превышает некоторое пороговое значение, при достижении которого они могут быть отделены от непрерывной фазы гравитационным осаждением. Для характеристики интенсивности разделения эмульсии оценивались общее число и средний размер капель, диаметр которых превышал $20 \mu\text{m}$.

Увеличение среднего размера капель $\langle d \rangle$ при воздействии электрического поля частотой $f = 100$ Hz при различных значениях амплитуд приложенного напряжения показано на рис. 2. Видно, что при воздействии поля средний размер капель увеличивается и достигает некоторого предельного значения, которое изменяется от 40 до $60 \mu\text{m}$ при увеличении амплитуды поля. Для количественной оценки интенсивности разрушения эмульсии экспериментальные данные $\langle d \rangle(t)$ были аппроксимированы зависимостями $\langle d \rangle = d_0(1 - \exp(-t/t_0))$, которые

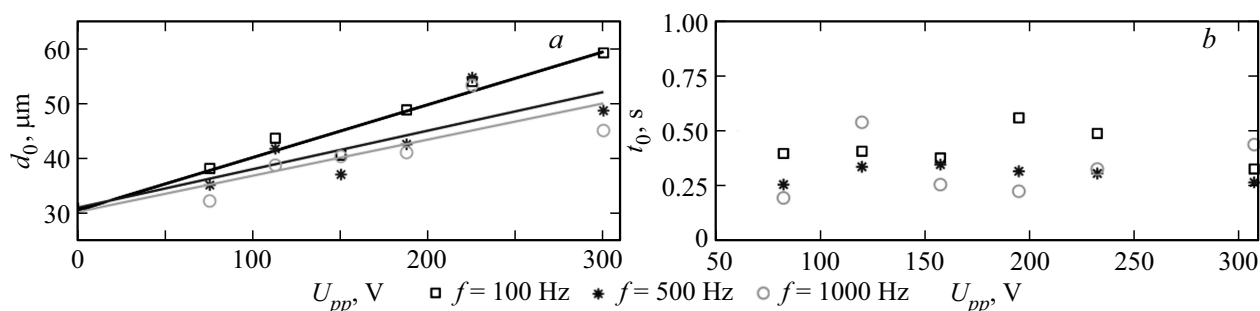


Рис. 3. Зависимости оценки максимального размера капель d_0 (a) и характерного времени разрушения эмульсии t_0 (b) от амплитуды приложенного напряжения при различных частотах воздействия.

показаны на рис. 2 сплошными и пунктирными линиями. Величина d_0 представляет собой предельное значение среднего диаметра капель, а t_0 характеризует скорость разрушения эмульсии. На рис. 3 показаны зависимости этих величин от амплитуды приложенного напряжения для трех различных частот воздействия.

Максимальный размер капель растет при увеличении амплитуды поля, как видно из рис. 3, a, где показаны также линейные аппроксимации этих зависимостей. Видно, что для частоты $f = 100$ Hz этот размер больше всего. Кроме того, нужно отметить, что для частот $f = 500$ и 1000 Hz максимальный размер капель достигается не при максимальном значении амплитуды поля, а при меньших значениях. Скорость разрушения эмульсии, характеризуемая величиной t_0 , в проведенных экспериментах не показала заметной зависимости от величины приложенного напряжения и его частоты (рис. 3, b).

Таким образом, в работе предложен экспериментальный подход для исследования динамики разрушения эмульсий при воздействии неоднородного электрического поля. Изготовлена оптически прозрачная ячейка с интегрированной системой электродов, позволяющая визуализировать процессы в эмульсиях при воздействии электрического поля, ведущие к их разрушению. Показано, что максимальный размер образующихся в результате слияния капель увеличивается при росте напряженности приложенного электрического поля. В дальнейшем предложенный подход будет использован для изучения разрушения эмульсий при совместном воздействии электрического и акустического полей.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-38-00756.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Taylor G.I. // Proc. Roy. Soc. Lond. A. 1964. V. 280. N 1382. P. 383–397. <https://doi.org/10.1098/rspa.1964.0151>
- [2] Zolfaghari R., Fakhru'l-Razi A., Abdullah L.C., Elnashaie S.S., Pendashteh A. // Sep. Purif. Technol. 2016. V. 170. P. 377–407. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.026>
- [3] Kilpatrick P.K. // Energy Fuels. 2012. V. 26. N 7. P. 4017–4026. <https://doi.org/10.1021/ef3003262>
- [4] Mohammed R.A., Bailey A.I., Luckham P.F., Taylor S.E. // Coll. Surf. A. 1993. V. 80. N 2-3. P. 237–242. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(93\)80203-Q](https://doi.org/10.1016/0927-7757(93)80203-Q)
- [5] Eow J.S., Ghadiri M., Sharif A.O., Williams T.J. // Chem. Eng. J. 2001. V. 84. N 3. P. 173–192. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00386-7](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00386-7)
- [6] Sjoblom J. Emulsions and emulsion stability. Surfactant science series/61. CRC Press, 2005. 662 p.
- [7] Jones T.B. Electromechanics of particles. Cambridge University Press, 2005. 265 p.
- [8] Velev O.D., Gangwal S., Petsev D.N. // Annu. Rep. C. 2009. V. 105. P. 213–246. <https://doi.org/10.1039/B803015B>
- [9] Movahed S., Li D. // Microfluid. Nanofluid. 2011. V. 10. N 4. P. 703–734. <https://doi.org/10.1007/s10404-010-0716-y>
- [10] <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>