

УДК 621.78.065.4  
PACS 47.57.Bc

## Динамика водомасляной эмульсии в неоднородном высокочастотном электрическом поле

А. В. Шмыров<sup>1</sup>, Е. А. Мошева<sup>1</sup>, А. И. Мизев<sup>1†</sup>, Р. Р. Сираев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

<sup>†</sup>alex\_mizev@icmm.ru

В статье представлены результаты лабораторного и численного моделирования поведения водомасляной эмульсии в неоднородном электрическом поле с целью изучения перспективности использования диэлектрофоретического эффекта для разделения жидких дисперсных сред. Задача рассмотрена в условиях нейтральной плавучести дисперсной фазы, когда динамика капельных включений определяется исключительно действием диэлектрофоретической силы. Неоднородное электрическое поле создавалось системой коаксиальных цилиндрических электродов. Эксперименты проведены в переменном электрическом поле с частотой 10 кГц, что позволило избежать проявления электрофоретических и электрокинетических явлений. В работе исследована как динамика отдельных капель, так и изменение содержания дисперсной фазы от времени в электрическом поле. Обнаружено, что капли воды всегда движутся в направлении градиента напряженности, аккумулируясь, в конечном итоге, на внутреннем электроде. Время достижения отдельной каплей внутреннего электрода существенно зависит от ее размера и начального расстояния до внутреннего электрода, величины действующего напряжения и диэлектрической проницаемости дисперсионной среды. Показано, что при выборе начального расстояния от капли до внутреннего электрода и общего времени движения капли в качестве единиц измерения текущего расстояния и времени, соответственно, результаты всех экспериментов образуют единую зависимость в указанных безразмерных переменных. В экспериментах обнаружено, что скорость разделения эмульсии увеличивается с ростом среднего размера капель, действующего напряжения, диэлектрической проницаемости дисперсионной среды и начальной концентрации капель. Показано, что в последнем случае зависимость обусловлена наличием случаев коалесценции капель, частота которых растет с увеличением концентрации. Результаты, полученные в ходе численного моделирования, находятся в хорошем количественном согласии с экспериментом. В заключение проводится сравнение результатов лабораторного и численного экспериментов, а также обсуждаются преимущества предложенного метода электродегидратации по сравнению с существующими подходами.

**Ключевые слова:** диэлектрофорез; деэмульсация; дисперсная среда

Поступила в редакцию 02.05.2023; после рецензии 21.05.2023; принята к опубликованию 22.05.2023

## A water-oil emulsion dynamics in an inhomogeneous high-frequency electric field

A. V. Shmyrov<sup>1</sup>, E. A. Mosheva<sup>1</sup>, A. I. Mizev<sup>1†</sup>, R. R. Siraev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

†alex\_mizev@icmm.ru

The article presents the results of an experimental and numerical study of the behavior of a water-oil emulsion in an inhomogeneous electric field conducted to investigate the prospects of using the dielectrophoretic effect for the separation of liquid dispersed media. The problem is considered under conditions of neutral buoyancy of the dispersed phase, when the dynamics of droplet inclusions is determined solely by the action of the dielectrophoretic force. The inhomogeneous electric field was created by a system of coaxial cylindrical electrodes. The experiments were carried out in an alternating electric field with a frequency of 10 kHz, which made it possible to avoid the manifestation of electrophoretic and electrokinetic phenomena. We studied both the dynamics of individual droplets in an electric field and the change in the content of the dispersed phase at different moments of time. It was found that water droplets always move in the direction of the intensity gradient, eventually accumulating on the internal electrode. The time it takes a single drop to reach the inner electrode significantly depends on its size and the initial distance to the inner electrode, the magnitude of the effective voltage, and the permittivity of the dispersion medium. It is shown that when choosing the initial distance from the drop to the inner electrode and the total time of the drop movement as measurement units for the current distance and time, respectively, the results of all experiments form a single dependence in these dimensionless variables. It was found that the emulsion separation rate increases with an increase in the average droplet size, the effective voltage, the dielectric constant of the dispersion medium and the initial concentration of droplets. It is shown that in the latter case, the dependence is due to the presence of cases of droplet coalescence, the frequency of which increases with increasing concentration. The results obtained during numerical simulation are in good quantitative agreement with the experiment. In conclusion, the results of the laboratory and numerical experiments are compared, the advantages of the proposed method of electrodehydration in comparison with existing approaches are discussed.

**Keywords:** dielectrophoresis; demulsification; dispersed medium

*Received 02 May 2023; revised 21 May 2023; accepted 22 May 2023*

doi: 10.17072/1994-3598-2023-2-22-35

## 1. Введение

Поведение дисперсных сред в электрическом поле является предметом интенсивных исследований на протяжении нескольких десятков лет. Интерес исследователей к данной тематике вызван, в первую очередь, поиском новых путей управления такими средами в различных технологических процессах. В дисперсной среде, помещенной во внешнее электрическое поле, разница электрофизических свойств дисперсионной среды и дисперсной фазы может приводить к появлению электрического заряда как на межфазной границе, так и в объемах фаз. В зависимости от агрегатного состояния и физико-химических свойств каждой из фаз и пространственно-временных характеристик электрического поля взаимодействие такого заряда и внешнего поля может приводить как к изменению дисперсного состава, так и пространственному перераспределению дисперсной фазы.

В настоящей статье данная проблема рассмотрена на примере взаимодействия электрического поля и водомасляной эмульсии, дисперсной среды, сформированной каплями воды, распределенными в объеме неполярной, как правило, органической, жидкой фазы. Образование такого рода дисперс-

ных сред нередко сопровождается многими технологическими процессами в пищевой, химической и нефтегазовой промышленности. В ряде случаев содержание воды в конечном продукте является нежелательным, что требует разделения эмульсии на финальной стадии процесса. Наиболее актуальной указанная проблема является в процессах добычи и переработки нефти, так как наличие воды в нефти и нефтепродуктах существенно увеличивает энергозатраты на ее транспортировку, а также приводит к ускоренной коррозии нефтеперерабатывающей аппаратуры. На сегодняшний день для разделения водонефтяных эмульсий применяются различные методы, основанные на использовании различия физико-химических свойств воды и нефти [1]: гравитационное или центробежное осаждение, ультразвуковое воздействие (разность плотностей), фильтрация (различия в смачивании материала фильтра), термическое воздействие (уменьшение вязкости дисперсионной среды, увеличение разности плотностей за счет разницы в коэффициентах температурного расширения, ослабление адсорбированных слоев), химическое воздействие (деэмульгаторы, изменение pH), воздействие электрическим полем (разница проводимости и/или диэлектрической проницаемости).

Разделение водонефтяных эмульсий в электрических полях считается наиболее дешевым и эффективным методом, оказывающим наименьшее влияние на нефть в процессе обработки [2, 3]. Несмотря на то, что идея использования электрического поля для отделения воды была предложена более ста лет назад [4], принцип работы электродегидраторов практически не изменился. В основе процесса лежит явление электрокоалесценции [5]. В однородном постоянном или переменном промышленной частоты 50 Гц электрическом поле капли воды поляризуются, притягиваются и коалесцируют, благодаря чему происходит более быстрое осаждение укрупненных капель. Метод имеет ряд ограничений. Метод неэффективен в случае малых концентраций, меньше 0.5%, вследствие короткодействующего диполь-дипольного взаимодействия, и неприменим для больших концентраций, больше 5%, из-за выстраивания капельных цепочек с последующим межэлектродным замыканием. Имеется также ограничение на предельный размер растущих капель, после которого, при фиксированной напряженности, наблюдается обратный распад включений. Однако основным недостатком метода, по мнению авторов настоящей статьи, является использование электрического поля только для изменения дисперсного состава, тогда как для разделения по-прежнему используется гравитационное осаждение.

Альтернативным направлением использования электрического поля для целей разделения водомасляных эмульсий, по мнению авторов, является применение неоднородного поля. В этом случае на включения дисперсной фазы, имеющей отличную от дисперсионной среды диэлектрическую проницаемость, со стороны электрического поля будет действовать дополнительная сила, называемая диэлектрофоретической, которая направлена вдоль градиента напряженности электрического поля. Это явление достаточно широко используется для пространственного перераспределения включений дисперсных сред в таких устройствах, как клеточные сепараторы [6–8], фильтры [9–11], световой пинцет [12, 13]. При использовании постоянного поля даже слабая проводимость сред и наличие границ полости приводят к появлению электрокинетических и электрофоретических явлений, на фоне которых диэлектрофоретические эффекты проявляют себя достаточно слабо. По этой причине в устройствах, использующих диэлектрофорез для манипуляции включений в дисперсионных средах, применяется, как правило, переменное электрическое поле. В этом случае усредненная по времени сила, действующая на сферическую частицу диаметром  $d_p$ , определяется как [14]:

$$\langle F_{DEP} \rangle = \frac{\pi}{4} d_p^3 \varepsilon_0 \varepsilon_f \operatorname{Re}[\tilde{f}_{CM}(\omega)] \nabla |E_{rms}|^2. \quad (1.1)$$

Здесь  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon_f$  – относительная диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды,  $E_{rms}$  – действующее значение напряженности электрического поля,  $\operatorname{Re}[\tilde{f}_{CM}(\omega)]$  – действительная часть функции Клаузиуса–Моссотти, содержащей частотную зависимость диэлектрофоретической силы:

$$\operatorname{Re}[\tilde{f}_{CM}(\omega)] = \frac{\tilde{\varepsilon}_p - \tilde{\varepsilon}_f}{\tilde{\varepsilon}_p + 2\tilde{\varepsilon}_f}, \quad (1.2)$$

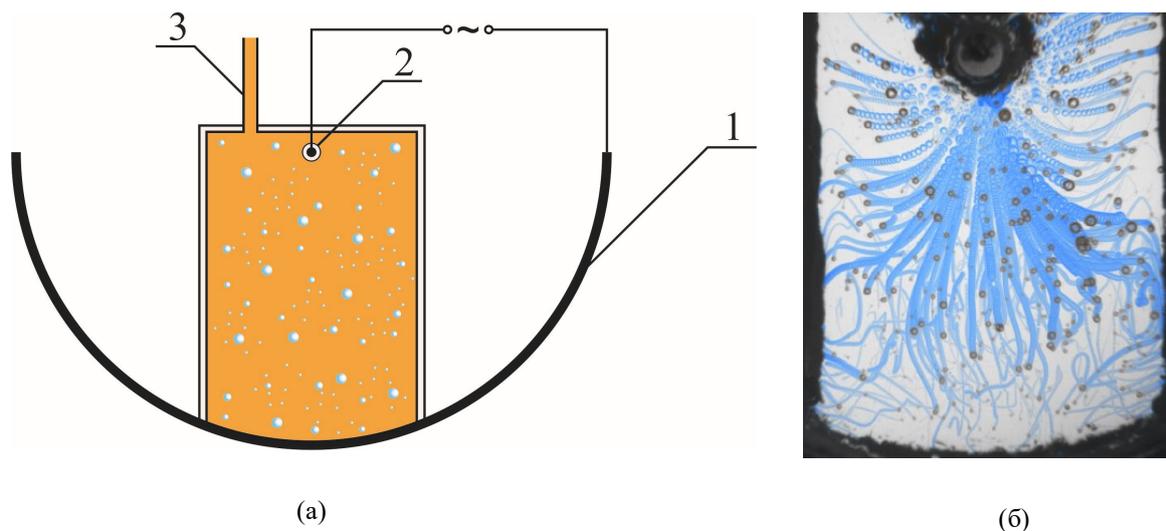
где  $\tilde{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon + i\sigma/\omega$  – комплексная диэлектрическая проницаемость каждой из сред (индексы  $p$  и  $f$  обозначают дисперсную фазу и дисперсионную среду, соответственно), зависящая от диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , проводимости  $\sigma$  и круговой частоты  $\omega$  изменений поля. Из выражения (1.2) видно, что знак функции Клаузиуса–Моссотти может меняться в зависимости от соотношения электрофизических характеристик дисперсной фазы и дисперсионной среды. Поскольку все величины, входящие в выражение (1.1), знакоположительные, то знак функции Клаузиуса–Моссотти будет определять направление диэлектрофоретической силы. Если  $\operatorname{Re}[\tilde{f}_{CM}(\omega)] > 0$ , сила сонаправлена с градиентом напряженности и дисперсная фаза аккумулируется в области сильного поля. В этом случае говорят о положительном диэлектрофорезе. Если  $\operatorname{Re}[\tilde{f}_{CM}(\omega)] < 0$ , то, наоборот, включения выталкиваются из области сильного поля, и говорят об отрицательном диэлектрофорезе.

Для сложных по структуре включений, таких как клетки или бактерии, имеющих в своем составе свободные ионы и взвешенных, как правило, в проводящих электролитах, величина функции Клаузиуса–Моссотти может сложным образом зависеть от частоты приложенного поля, меняя знак при определенной критической частоте, называемой частотой Максвелла–Вагнера. Это позволяет, варьируя частоту поля, аккумулировать клетки в определенных областях проточных микроканалов, что используется в клеточных сепараторах. Кроме того, измерения частоты Максвелла–Вагнера позволяет исследовать электрофизические свойства отдельных клеток или бактерий.

Для диэлектрических или слабопроводящих дисперсных сред с однородной дисперсной фазой, таких как водомасляные эмульсии, рассматриваемые в настоящем исследовании, вклад токов проводимости исчезающе мал, и действительная часть функции Клаузиуса–Моссотти может быть вычислена как:

$$\operatorname{Re}[\tilde{f}_{CM}] = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_f}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_f}. \quad (1.3)$$

Поскольку диэлектрическая проницаемость слабо зависит от частоты, то и величина функции будет слабой функцией от частоты, сохраняя свой знак в широком диапазоне частот электрического поля. Учитывая, что диэлектрическая проницае-



**Рис. 1.** *а* – схема экспериментальной установки: 1 – внешний электрод, 2 – внутренний электрод, 3 – заливочное отверстие; *б* – трековые изображения капель эмульсии, иллюстрирующие структуру электрического поля в кювете

мость воды (дисперсная фаза)  $\epsilon_p = 80$  почти в двадцать раз больше диэлектрической проницаемости нефти (дисперсионная среда)  $\epsilon_f \approx 2.2$ , будет всегда наблюдаться положительный диэлектрофорез и величина  $\text{Re}[\tilde{f}_{CM}] \approx 1$  в широком диапазоне частот электрического поля. Это дает потенциально эффективный инструмент для пространственного разделения таких эмульсий, действующий дополнительно к гравитационному осаждению.

В настоящей работе представлены результаты пилотного экспериментального исследования с целью изучения перспективности использования неоднородного электрического поля для разделения водомасляных эмульсий за счет диэлектрофоретического эффекта. Исследования поведения капель воды в неоднородном электрическом поле велись и раньше [15–17]. Однако в них изучалась динамика отдельных капель, движущихся в том числе под действием гравитации. Кроме того, в предыдущих исследованиях использовалось, как правило, постоянное или низкочастотное электрическое поле, что не позволяло выделить в чистом виде действие диэлектрофоретической силы на фоне электрофоретических эффектов. Новизна постановки настоящего исследования состоит в изучении динамики не отдельных капель, а эмульсий с определенными концентрациями и дисперсным составом. Исследование проведено с водомасляными эмульсиями с нулевым контрастом плотности, что позволило изучать действие диэлектрофоретической силы в отсутствие гравитационного осаждения. Кроме того, впервые проведены исследования в электрическом поле высокой, 15 кГц, частоты, период которого много меньше Максвелловского времени релаксации заряда в среде, что позволило избежать проявления электрофоретических эффектов.

## 2. Эксперимент

### 2.1. Экспериментальная установка и методики

Эксперименты были проведены в прямоугольной кювете (рис. 1, *а*), боковые и верхняя граница которой выполнены из прозрачных стеклянных пластин толщиной 0.1 см. Размеры внутренней полости кюветы составляли: высота 1.9 см, ширина 1.4 см и глубина 0.9 см. Неоднородное электрическое поле создавалось системой коаксиальных цилиндрических электродов. Внешний электрод (позиция 1, рис. 1, *а*), с внутренним радиусом 1.6 см, изготовленный из нержавеющей стали толщиной 0.1 см, ограничивал кювету снизу. Внутренний электрод (позиция 2, рис. 1, *а*) представлял собой стержень из нержавеющей стали радиусом 0.075 см, который проходил сквозь переднюю и заднюю стенки кюветы через отверстия, расположенные вблизи верхней границы полости. Поскольку внутренний электрод является местом накопления водной фазы в процессе разделения, он был изолирован от жидкой среды тонкостенной (толщина стенки 0.5 мм) стеклянной трубкой во избежание электрохимических реакций. Для минимизации искажений электрического поля внутри кюветы, связанных с конечными размерами электродов, размеры последних были заведомо больше размеров полости: аксиальный и азимутальный размеры внешнего электрода составляли 3.0 см и  $\pi$ , соответственно, а длина внутреннего электрода – 3.0 см. Электроды были подключены к высоковольтному источнику переменного тока, который обеспечивал напряжение фиксированной частоты 15 кГц с максимальной величиной действующего напряжения  $U_0 = 3.6$  кВ.

В исследованиях были использованы две водомасляные эмульсии, различающиеся дисперсионной средой. В основной части экспериментов в качестве последней была использована смесь бензола и хлорбензола, которые могут смешиваться между собой в любой пропорции. Концентрации веществ в смеси были подобраны таким образом, чтобы плотность дисперсионной среды была равна плотности воды, используемой в качестве дисперсионной фазы. Плотность смеси и воды измерялась вибрационным измерителем плотности (VIP-2MP, Thermex, Russia). Равенство плотностей позволяло проводить исследования в условиях нейтральной плавучести, когда динамика капельных включений определяется исключительно действием диэлектростатической силы. В части экспериментов в качестве дисперсионной среды была использована смесь бензола и нитробензола, плотность которой была также подобрана равной плотности дисперсионной фазы. Относительная диэлектрическая проницаемость смеси бензол-нитробензол составляет 18, что больше по сравнению со смесью бензола и хлорбензола, где эта величина составляет 3.6. Это позволило исследовать влияние диэлектрических свойств дисперсионной среды на скорость разделения эмульсии.

Эмульсия приготавливалась непосредственно перед каждым экспериментом и не использовалась повторно в последующих экспериментах. Для приготовления эмульсии в шприц помещался определенный объем дисперсионной среды, в который вносилась капля воды фиксированного объема. В экспериментах были использованы эмульсии с объемной концентрацией воды 0.2 %, или 1.0 %. После внесения обеих сред шприц встряхивался. Дозирование интенсивности и длительности процесса позволяло получать эмульсии с разным дисперсным составом при неизменной концентрации дисперсионной фазы. Основная часть экспериментов проведена с эмульсиями с концентрацией дисперсионной фазы 0.2 % и тремя различными распределениями капель по размерам.

Для визуализации капель воды использовалась схема контрольного освещения, которая позволяет получать наиболее контрастное изображение края капель. Для этой цели с противоположной от видеокамеры стороны кюветы устанавливался коллимированный светодиодный источник белого света (Metaphase Technologies, США). Изображение эмульсии регистрировалось с помощью видеокамеры UI-3250 (IDS, Германия) с высоким пространственно-временным разрешением. Разрешение на изображении составляло 15  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ . Большая глубина резкости объектива позволяла одновременно анализировать изображения капель, расположенных на разном расстоянии между передней и задней границами полости. Изображения с последовательности кадров использовались для расчета характеристик эмульсии

в различные моменты времени как до, так и после включения электрического поля. С этой целью на каждом изображении производился поиск границ отдельных капель, и вычислялись индивидуальные размеры капель, а также суммарный объем дисперсионной фазы в различные моменты времени (открытый программный пакет ImageJ). По начальным изображениям, полученным до включения электрического поля, рассчитывались характеристики начального распределения капель по размерам. По изображениям, полученным в различные моменты времени после включения электрического поля, рассчитывался суммарный объем оставшейся дисперсионной фазы. Полученные для каждого момента времени значения нормировались на начальный объем дисперсионной фазы. По результатам покадрового анализа строился график зависимости нормированного содержания воды в эмульсии от времени  $W(t)$ , по которому оценивалась эффективность процесса дегидратации в зависимости от параметров задачи: средний размер капель в изначальной эмульсии, действующая разность потенциалов на электродах, диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды, концентрация дисперсионной фазы. Кроме того, для каждой видеозаписи анализировалась динамика отдельных капель. Такие измерения проводились только для эмульсий с концентрацией воды 0.2 %, где капли расположены достаточно редко, чтобы влиять на движение друг друга.

В начале каждого эксперимента созданная описанным выше способом эмульсия относительно медленно заливалась в кювету через заливочное отверстие (позиция 3 на рис. 1 а), и затем выжидалось некоторое время, необходимое для затухания остаточного движения эмульсии, возникающего в процессе заливки. После этого на электроды подавалась разность потенциалов и записывалось на видео движение капель эмульсии.

## 2.2. Результаты

Изучение динамики дисперсионной фазы в электрическом поле показало, что капли воды всегда движутся в направлении градиента напряженности, аккумулируясь, в конечном итоге, на внутреннем электроде. Траектории отдельных капель являются радиальными только в центральной части кюветы (рис. 1, б). Основные искажения поля, связанные с разностью электрофизических характеристик жидкости и воздуха снаружи полости, сосредоточены вблизи боковых стенок полости, где и наблюдаются отклонения траекторий капель от радиальных. В связи с этим изучение динамики отдельных капель проводилось в центральной области кюветы, где искажения поля минимальны. Кроме того, наблюдения показали, что даже в экспериментах с концентрацией дисперсионной фазы 0.2 % близкие расположенные капли притягиваются друг к другу во время движения, что приводит к их коалесценции.

При анализе динамики отдельных капель такие случаи не рассматривались.

Наблюдения за движением отдельных капель показали, что время достижения капель внутреннего электрода существенно зависит от всех управляющих параметров задачи. На рис. 2, а приведен пример зависимости расстояния от капли до центра внутреннего электрода от времени, полученной для нескольких капель в одном из экспериментов с фиксированной амплитудой переменного электрического поля. Видно, что крупные капли достигают внутреннего электрода быстрее более мелких, будучи даже расположенными изначально на большем расстоянии. В целом, анализ экспериментов, проведенных при различных условиях, показал, что время достижения капель внутреннего электрода уменьшается при уменьшении начального положения капли, увеличении ее диаметра и увеличении разности потенциалов между электродами. Также замечено, что капли достигают внутреннего электрода быстрее в дисперсионной среде с большей диэлектрической проницаемостью, т.е. в смеси нитробензола и бензола. Указанные наблюдения хорошо согласуются с выражением для диэлектрофоретической силы (1.1).

Несмотря на значительные количественные различия, зависимости, полученные в разных экспериментальных условиях, выглядят подобными. Это становится очевидным, если отнормировать полученные экспериментальные данные, используя начальное расстояние от капли до внутреннего электрода  $r_0$  и общее время движения капли  $t_0$  в качестве единиц измерения текущего расстояния и времени, соответственно. В указанных координа-

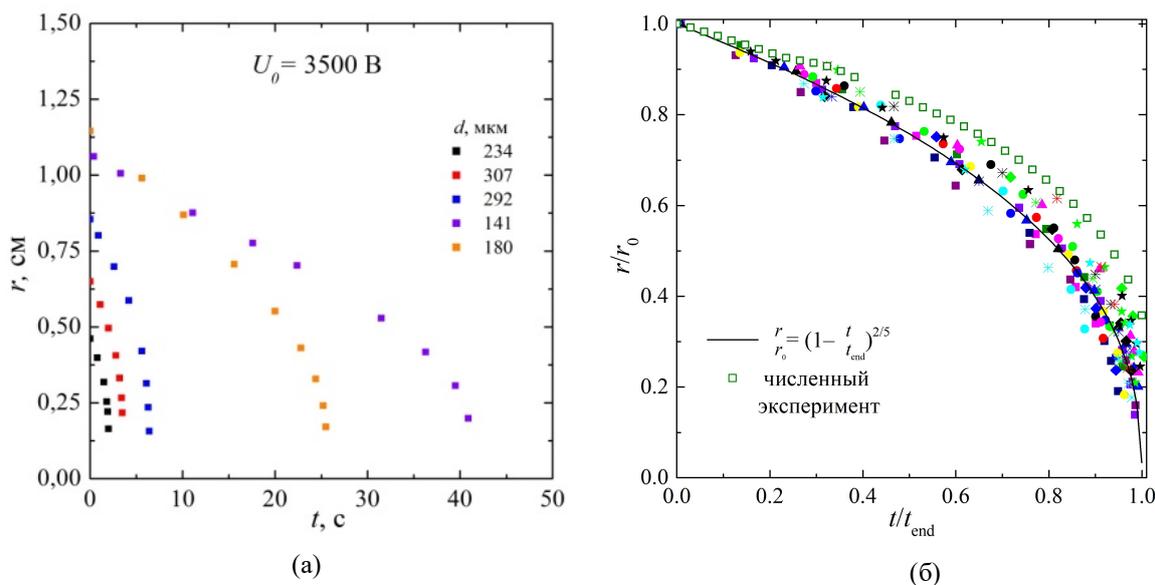
тах все экспериментальные данные образуют единую зависимость (рис. 2, б), наилучшей аппроксимацией для которой является функция

$$\frac{r}{r_0} = \left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^{2/5}$$

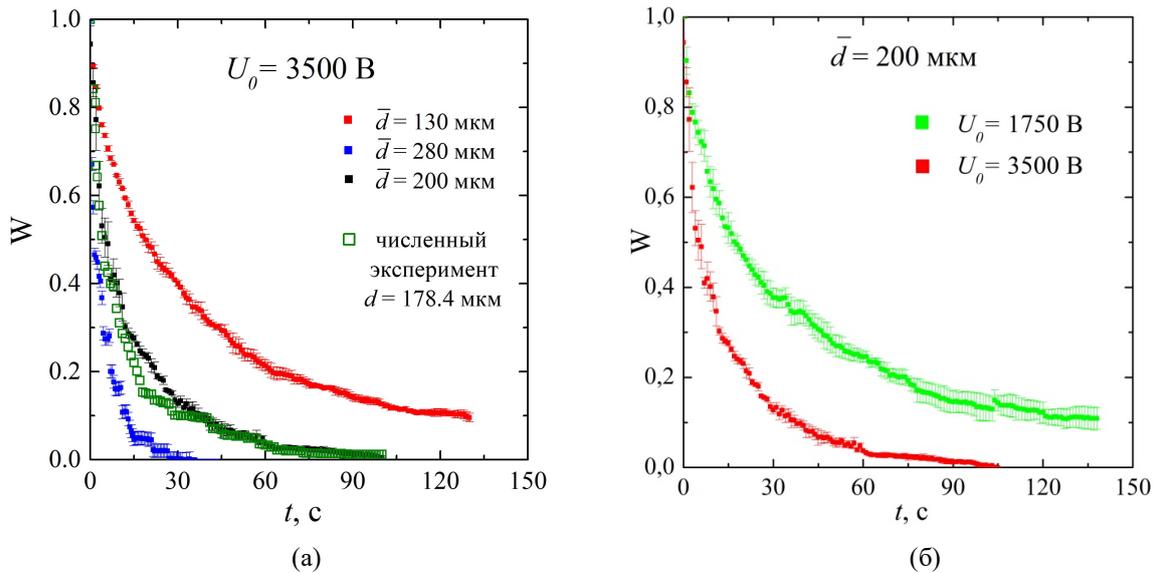
(сплошная линия на рис. 2, б).

Исследования эффективности процесса дегидратации показали, что скорость уменьшения содержания воды в эмульсии существенно зависит от всех управляющих параметров задачи. Сильнее всего скорость разделения эмульсии зависит от размера капель. На рис. 3, а представлена временная эволюция содержания воды в кювете для трех различных по дисперсному составу эмульсий при фиксированных значениях остальных управляющих параметров: разность потенциалов, содержание дисперсионной среды и начальная концентрация капель. Видно, что эффективность дегидратации быстро повышается с ростом среднего размера капель. Время, необходимое для уменьшения содержания капель в пять раз, сокращается примерно на порядок при увеличении медианного размера капель в эмульсии в два раза. Указанные наблюдения хорошо согласуются с выражением для диэлектрофоретической силы, величина которой зависит от размера включения в третьей степени.

Динамика разделения эмульсии также зависит от величины действующего значения напряжения между электродами, увеличение которого приводит к существенному ускорению процесса. На рис. 3, б приведена зависимость нормированного



**Рис. 2.** а – временная зависимость положения отдельных капель относительно центра внутреннего электрода, полученная для капель разного размера при фиксированной величине действующего напряжения; б – безразмерное положение капли относительно центра внутреннего электрода как функции безразмерного времени, полученные в лабораторных и численных экспериментах с различными условиями



**Рис. 3.** Изменение со временем содержания капель: а – для трех эмульсий, различающихся по среднему размеру включений при фиксированной величине действующего напряжения; б – в двух одинаковых эмульсиях при различных действующих напряжениях на электродах. Дисперсионная среда – бензол-хлорбензол, концентрация дисперсной фазы – 0.2%. Для сравнения на рис. 3, а приведены результаты численного эксперимента

содержания капель от времени, полученная в экспериментах с одинаковыми эмульсиями, но при различных приложенных разностях потенциалов. Видно, что процесс разделения происходит примерно в четыре раза быстрее при увеличении разности потенциалов вдвое, что хорошо согласуется с выражением для величины диэлектрофоретической силы (1.2).

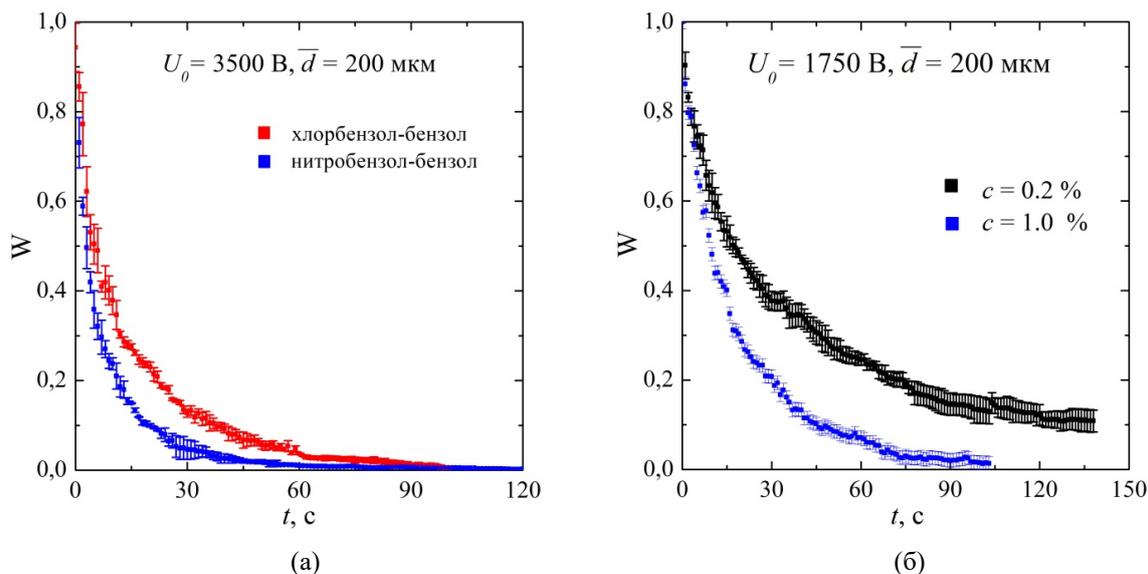
Наиболее слабое влияние на скорость дегидратации оказывает диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды. На рис. 4, а представлена временная эволюция содержания капель для двух одинаковых по дисперсному составу эмульсий, но с различной диэлектрической средой. Видно, что увеличение диэлектрической проницаемости более чем в четыре раза за счет замены хлорбензола на нитробензол ускоряет динамику разделения эмульсии менее чем вдвое. Причиной столь слабого влияния является тот факт, что диэлектрическая проницаемость входит в выражение для диэлектрофоретической силы дважды, по-разному влияя на ее величину.

С одной стороны, диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды входит в выражение для коэффициента Клаузиуса–Моссотти, величина которого уменьшается с увеличением данного параметра, уменьшая, таким образом, диэлектрофоретическую силу. С другой стороны, диэлектрическая проницаемость входит в выражение для силы напрямую, вследствие чего воздействие со стороны неоднородного поля увеличивается прямо пропорционально увеличению диэлектрической проницаемости внешней жидкости. В результате, указанные факторы частично компенсируют друг

друга, уменьшая, таким образом, общее влияние диэлектрической проницаемости.

Наиболее интересной и неожиданной, на первый взгляд, представляется обнаруженная в экспериментах зависимость скорости разделения эмульсии от начальной концентрации капель. На рис. 4, б показана зависимость содержания капель воды от времени для двух эмульсий с одинаковым дисперсным составом, но разными начальными концентрациями: 0.2 % и 1.0 %. Видно, что увеличение концентрации включений в пять раз приводит к ускорению процесса дегидратации примерно в два с половиной раза. Этот результат, на первый взгляд, кажется необъяснимым, поскольку диэлектрофоретическая сила напрямую не зависит от концентрации капель. Причина наблюдаемого явления становится ясна при кадрам видеонаблюдения, соответствующего случаю большей концентрации.

Анализ видео показывает, что соседние капли, движущиеся под действием диэлектрофоретической силы к внутреннему электроду, притягиваются друг к другу и, в конечном счете, сливаются. Это приводит к образованию более крупной капли, которая начинает двигаться быстрее, чем обе родительские капли, поскольку диэлектрофоретическая сила зависит от размера капли в третьей степени. Таким образом, слияние движущихся капель в эмульсии с большей концентрацией приводит к непрерывному увеличению среднего размера капель в эмульсии, увеличивая, таким образом, скорость дегидратации. В эмульсии с более низкой концентрацией, где среднее расстояние между каплями больше, слияние капель происходит го-



**Рис. 4.** Изменение со временем содержания капель: а – для двух эмульсий с различной дисперсионной средой; б – для двух эмульсий с различной начальной концентрацией дисперсной фазы

раздо реже, таким образом, не внося существенно-го вклада в ускорение процесса разделения эмульсии.

Необходимо отметить, что физическая причина электрокоалесценции в рассматриваемом в статье случае иная, нежели в существующих электродегидрататорах, где, как указывалось выше, за притяжение включений ответственно диполь-дипольное взаимодействие поляризующихся капель. В высокочастотном поле капли не успевают поляризоваться, и основным становится механизм, основанный на локальных искажениях поля вблизи капли [18]. В силу большей диэлектрической проницаемости воды, вблизи капли формируются области с большей напряженностью электрического поля, локализованные вблизи полюсов, ориентированных в направлении вектора напряженности. Такая локальная неоднородность электрического поля приводит к появлению вторичного диэлектрофоретического эффекта, способствующего взаимному притяжению соседних капель. Этот процесс электрокоалесценции и обеспечивает дополнительный рост дегидратации, наблюдающийся при увеличении концентрации эмульсии.

### 3. Численное моделирование

#### 3.1. Методика исследования

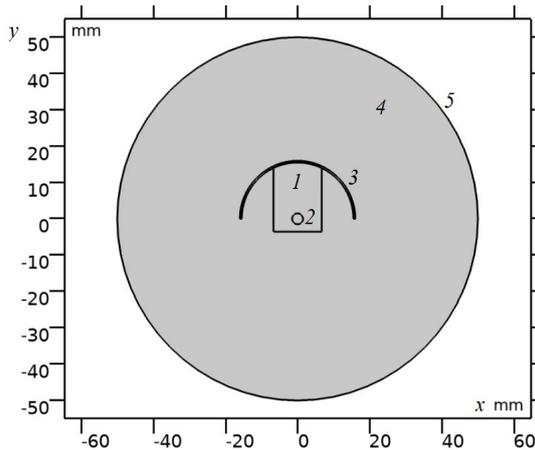
В данной части статьи представлены результаты численного моделирования движения отдельных капель воды в неоднородном электрическом поле и процесса дегидратации эмульсии. При постановке задачи был сделан ряд предположений, позволяющих упростить решение задачи, не теряя при этом основных аспектов проблемы. Основные упрощения касаются рассмотрения динамики

включений в постоянном электрическом поле, а не переменном как в эксперименте, и предположения, что наличие капель не изменяет поля в жидкой среде. Как указывалось выше, проведение экспериментов в высокочастотном приближении позволяет избежать эффектов, связанных с поляризацией капель. Это означает отсутствие собственного поля капель, искажающих распределение внешнего поля, создаваемого электродами. В таком приближении действие диэлектрофоретической силы на каплю со стороны переменного поля не будет отличаться от случая постоянного поля, если в численной модели в выражении для силы использовать экспериментальное значение действующего напряжения. Единственное, что, действительно, теряется при такой постановке, это искажение поля, связанные с разностью диэлектрических проницаемостей, которые возникают и в высокочастотном поле. Как указано в экспериментальной части статьи, такие искажения приводят к коалесценции капель за счет вторичного диэлектрофоретического эффекта. Однако поскольку численный эксперимент проводится для малых концентраций капель, где вклад коалесценции пренебрежимо мал, то такое упрощение постановки приемлемо для описания экспериментов с небольшим содержанием дисперсной фазы. Ещё одним упрощением постановки является рассмотрение задачи в двумерной постановке. Такое допущение при моделировании экспериментальных результатов выглядит оправданным, учитывая небольшой поперечный размер кюветы в экспериментах.

Задача решалась с использованием коммерческой версии пакета COMSOL Multiphysics (ПНИ-ПУ). Решение состояло из двух этапов: на первом определялись потенциал и напряженность электрического поля; на втором рассчитывалось дви-

жение ансамбля частиц (капель воды) в результате явления диэлектрофореза.

Геометрия задачи представлена на рис. 5. Кювета 1 заполнена смесью бензола и хлорбензола, которая не электропроводна и имеет диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_f=3.6$ . Электрическое поле создается двумя электродами: внутренним 2 с радиусом 0.75 мм и внешним 3, имеющим радиус кривизны 16.0 мм. На внутреннем электроде задается фиксированный потенциал, внешний электрод заземлен. В результате в кювете возникает электрическое поле со значительной неоднородностью.



**Рис. 5.** Геометрия задачи: 1 – кювета с эмульсией, 2 и 3 – электроды, 4 – воздушная среда, 5 – внешняя граница расчетной области

Кювета с электродами окружена воздушной средой 4 достаточно больших размеров, что необходимо для корректного расчета электрического поля. На границе этой области 5 ставятся мягкие граничные условия для электрического потенциала.

В экспериментальном исследовании использовалось переменное гармоническое поле. Для учета осредненного действия диэлектрофореза следует рассчитать среднеквадратические за период напряженность  $E_{rms}$  и потенциал  $V_{rms}$  электрического поля. Данная задача эквивалентна расчету электростатического поля:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= -\nabla V_{rms}, \\ \nabla \cdot (\epsilon_f \epsilon_0 \nabla V_{rms}) &= 0. \end{aligned} \quad (3.1)$$

На электродах 2 и 3 задавался потенциал

$$V|_2 = V_{0\ rms} \quad V|_3 = 0. \quad (3.2)$$

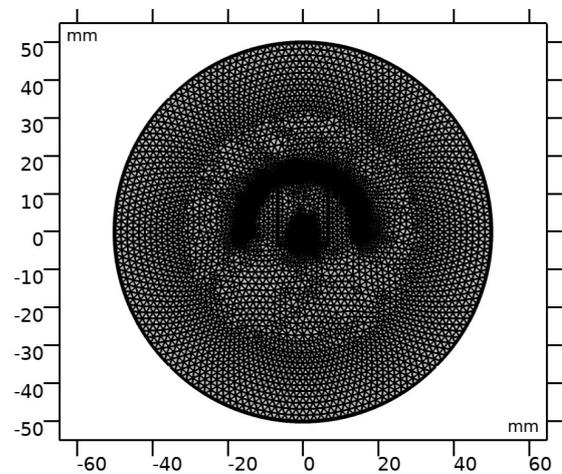
На границе 5 ставилось условие отсутствия зарядов

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0. \quad (3.3)$$

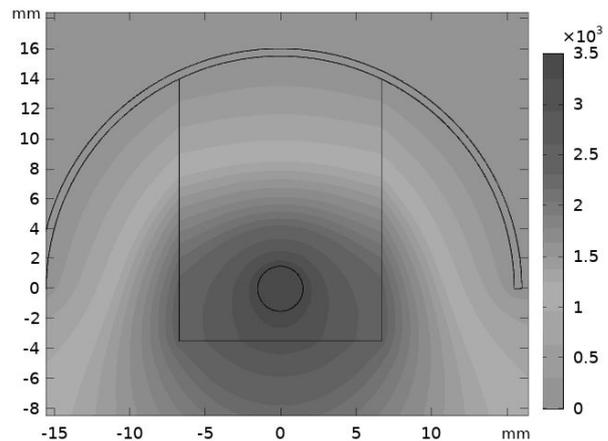
Для решения краевых задач пакет COMSOL Multiphysics использует метод конечных объемов. Область решения покрывается расчетной сеткой,

на которой в дальнейшем выполняется автоматическая дискретизация уравнений и граничных условий. Используемая в работе расчетная сетка построена в автоматическом режиме с указанием глобальных параметров (редкая, средняя, густая и т.д.) и приведена на рис. 6.

Расчитанное в соответствии с (3.1)–(3.3) при  $V_0 = 3500$  В поле потенциала приведено на рис. 7. Как видно из рисунка, электрическое поле в значительной степени неоднородное; оно резко усиливается вблизи внутреннего электрода. Результатом этого должен быть заметный эффект диэлектрофореза, особенно с учетом высокой относительной диэлектрической проницаемости капель воды ( $\epsilon_p=80$ ) по сравнению с проницаемостью окружающей жидкой среды ( $\epsilon_f=3.6$ ).



**Рис. 6.** Расчетная сетка



**Рис. 7.** Поле электростатического потенциала при  $V_0 = 3500$  В

Второй этап решения задачи был посвящен моделированию движения капель воды в поле диэлектрофоретической силы. При этом окружающая жидкость оставалась неподвижной. Динамика частиц моделировалась в COMSOL Multiphysics на основе уравнения движения. Учитывались только две силы: диэлектрофоретическая и сопротивления среды:

$$\begin{aligned}
 m_p \frac{\partial \mathbf{u}_p}{\partial t} &= \mathbf{F}_{DEP} + \mathbf{F}_D, \\
 \langle \mathbf{F}_{DEP} \rangle &= 2\pi r_p^3 \varepsilon_0 \varepsilon_f \text{Re}[\tilde{f}_{CM}(\omega)] \nabla |E_{rms}|^2, \\
 \mathbf{F}_D &= -\frac{1}{\tau_p} m_p \mathbf{u}_p, \\
 \tau_p &= \frac{4\rho_p d_p^2}{3\mu_f C_D \text{Re}}, \\
 C_D &= \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}), \\
 \text{Re} &= \frac{\rho_f |\mathbf{u}_p| d_p}{\mu_f}, \\
 t = 0: \quad \mathbf{u}_p &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Здесь  $\rho$  – плотность,  $\mu$  – динамическая вязкость,  $\mathbf{u}_p$ ,  $m_p$  – скорость и масса капли,  $r_p$ ,  $d_p$  – радиус и диаметр капли,  $C_D$  – коэффициент сопротивления, индексы  $p$  и  $f$  соответствуют капле и окружающей жидкости. Предполагалось, что форма капель сферическая. Функция Клаузиуса–Моссотти  $\tilde{f}_{CM}(\omega)$  для рассматриваемой суспензии близка к единице.

Для вычисления силы сопротивления среды, действующей на каплю, использовалась модель силы сопротивления Шиллера–Неймана [19]. Данная модель в COMSOL Multiphysics – наиболее корректно работающая при числах Рейнольдса порядка единицы и более. Предварительные расчеты показали, что число Рейнольдса по мере вхождения капли в область электрического поля с большими значениями диэлектрофоретической силы достигает нескольких единиц, вплоть до 10.

### 3.2. Изучение динамики одиночных капель

С целью определения влияния параметров (размер капли, ее начальное положение) на динамику движения частиц рассматривалось движение одиночных капель. Наблюдалось движение капель, которые в начальный момент находятся на оси симметрии OY и покоятся, следовательно, в дальнейшем они движутся вдоль оси OY. Изучение зависимости расстояния капель  $y$  от начала координат (центр внутреннего электрода) показало, что зависимости  $y(t)$  для различных частиц, имеющих разный диаметр и разное начальное положение, подобны. Так же, как и в экспериментальной части, координаты были нормированы к начальному значению координаты этой частицы, а время – ко времени движения частицы. На рис. 4, а результаты численного и лабораторного экспериментов приведены для сравнения. Видно, что кривая, полученная в численном эксперименте, лежит немного выше экспериментальных данных, что говорит о более медленном движении одиночных капель. Скорее всего, наблюдающееся отличие связано с различиями в распределении электрического поля,

полученного в расчетах и реально существующего в кювете. В частности, в численной модели не учтены стеклянные стенки, ограничивающие кювету, которые имеют отличные от воздуха и дисперсионной среды электрофизические свойства, что может повлиять на распределение напряженности поля вдоль оси Y.

### 3.3. Моделирование движения ансамбля частиц. Расчет эффективности разделения эмульсии

Расчет проводился для ансамбля 206 капель, случайным образом распределенных по кювете, в поле с потенциалом электрода 3500 В, что соответствовало величине действующего напряжения в одном из экспериментов. Начальное распределение капель по размерам показано на рис. 8 (средний размер 178.4 мкм). Диаметр капли сказывается на величине диэлектрофоретической силы: с ростом диаметра она возрастает. Кроме того, с увеличением размера капли значительно возрастает объем воды, которую она переносит, что следует учитывать при расчете эффективности разделения. Поэтому распределение капель по диаметру заметно влияет на результат решения рассматриваемой задачи. Ансамбль частиц с распределением, показанным на рис. 8, близок к одному из использовавшихся в экспериментах варианту эмульсий.

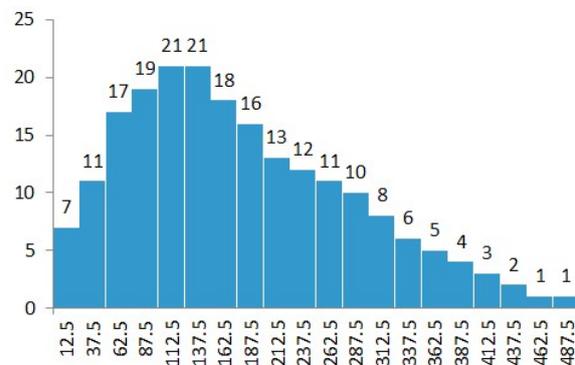


Рис. 8. Начальное распределение капель в ансамбле по диаметрам

Расчеты показывают, что капли воды движутся в сторону внутреннего электрода (рис. 9), постепенно набирая скорость. Небольшая часть капель движется в сторону внешнего электрода к углам кюветы. Здесь, как и в эксперименте (см. рис. 1, б), находится область с повышенными градиентами напряженности электрического поля, но диэлектрофоретический эффект слабее, чем у внутреннего электрода. Также из расчетов следует, что быстрее всего из эмульсии уходят большие капли (рис. 10). Хотя по истечении 100 с в кювете еще остаются капли (см. рис. 10, б), но их размер мал, и они содержат незначительную долю от начального (см. рис. 10, а) содержания воды.

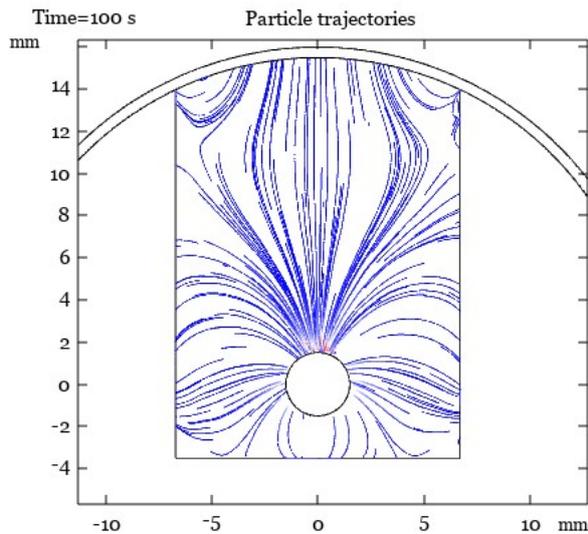


Рис. 9. Траектории капель за первые 100 с движения

При вычислениях считалось, что капли достигшие электрода, исчезают. Вследствие этого для модели характерно, что количество капель и общая масса воды в кювете, которая в них содержится, со временем уменьшаются. Это позволяет определить эффективность разделения эмульсии как отношение интегральной по кювете величины, характеризующей капли в момент времени  $t$ , к значению этой величины в начальный момент:

$$W(t) = \frac{\sum_{i=1}^n S_{pi}(t)}{\sum_{i=1}^n S_{pi}(0)}. \quad (3.5)$$

Здесь индекс  $i$  обозначает номер частицы,  $n = 206$  общее число частиц,  $S_p = \pi r_p^2$  – площадь капли. На рис. 3, а приведены графики зависимости величины  $W$  от времени, полученные в расче-

тах. Сравнение результатов численного моделирования с данными эксперимента, приведенными на том же графике, показывает хорошее количественное согласие.

#### 4. Заключение

Представленные в статье результаты исследования демонстрируют перспективность использования диэлектрофоретического эффекта, как эффективного инструмента разделения водомасляных эмульсий. В отличие от существующих конструкций электродегидраторов, где действие электрического поля приводит только к изменению дисперсного состава эмульсии, в предложенной в настоящей статье постановке электрическое поле используется, в первую очередь, для пространственного перераспределения капельных включений. В реальных водонефтяных эмульсиях, с ненулевым контрастом плотности, неоднородное электрическое поле будет действовать, как дополнительное к гравитационному силовое поле, способствуя более быстрому осаждению капель. Особенно весомым вклад диэлектрофоретической силы будет в случае тяжелых сортов нефти, где разность плотностей минимальна. Второе важное преимущество использования неоднородного электрического поля для разделения эмульсий состоит в отсутствии физических ограничений по концентрации эмульсии как сверху, так и снизу. Как уже упоминалось выше, короткодействие диполь-дипольного взаимодействия делает крайне неэффективным использование существующих электродегидраторов для концентраций дисперсной фазы менее 0.5%. Представленные выше результаты экспериментов убедительно демонстрируют эффективность метода при меньших концентрациях эмульсии. Использование высокочастотного поля позволяет также

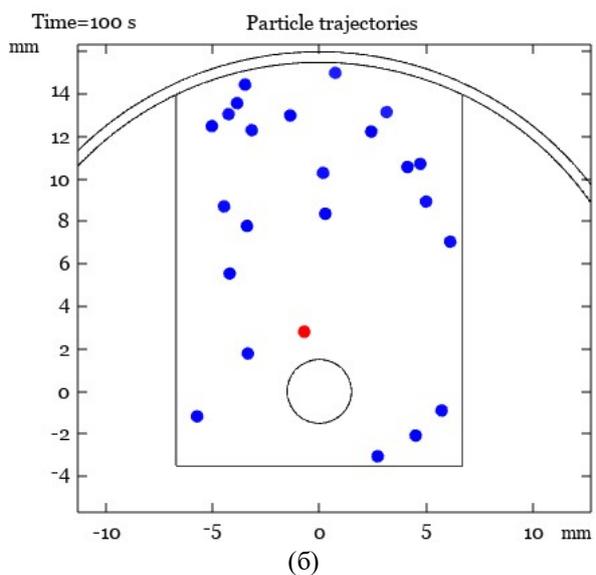
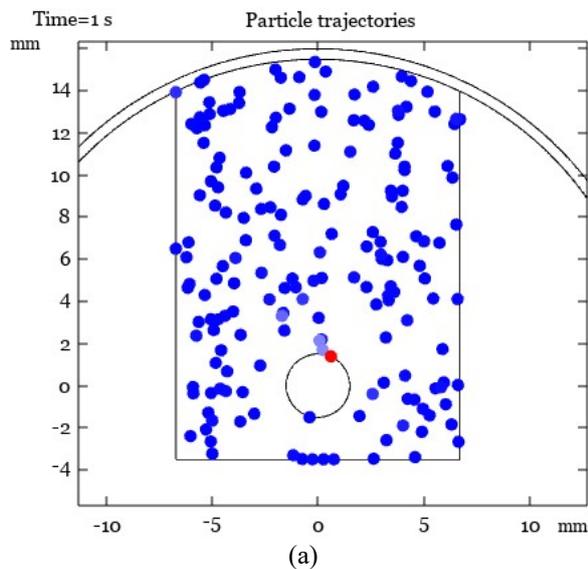


Рис. 10. Положение капель при: а –  $t = 1$  с; б –  $t = 100$  с

избежать проблемы формирования цепочечных агрегатов, и, следовательно, снимает связанные с этим ограничения на большие концентрации дисперсной фазы. Более того, в эмульсиях с концентрацией больше 1% процесс только усиливается за счет явления электрокоалесценции, вызываемой вторичным диэлектрофоретическим эффектом. Отметим также, что описанный в статье процесс разделения базируется на относительно простых и известных физических явлениях, которые легко моделируются в численном эксперименте, что позволит в будущем рассчитывать оптимальную конструкцию электродегидратора.

## 5. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках проекта № 20-41-596009.

## Список литературы

1. Saad M. A., Kamil M., Abdurahman N. H., Yunus R. M., Awad O. I. An overview of recent advances in state-of-the-art techniques in the demulsification of crude oil emulsions // *Processes*. 2019. Vol. 7. N. 7, 470. DOI: 10.3390/pr7070470
2. Eow J. S., Ghadiri M., Sharif A. O., Williams T. J. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding // *Chemical Engineering Journal*. 2001. Vol. 84. N. 3. P. 173-192. DOI: 10.1016/S1385-8947(00)00386-7
3. Eow J. S., Ghadiri M. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology // *Chemical Engineering Journal*. 2002. Vol. 85. N. 2-3. P. 357-368. DOI: 10.1016/S1385-8947(01)00250-9
4. Cottrell F. G., Speed J. B. Separating and collecting particles of one liquid suspended in another liquid. United States patent US987115A. Patented March 21, 1911.
5. Mhatre S., Vivacqua V., Ghadiri M., Abdullah A. M., Al-Marri M. J., Hassanpour A., Kermani B. Electrostatic phase separation: A review // *Chemical Engineering Research and Design*. 2015. Vol. 96. P. 177-195. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.02.012
6. Pethig R. Dielectrophoresis: Status of the theory, technology, and applications // *Biomicrofluidics*. 2010. Vol. 4. N. 2, 022811. DOI: 10.1063/1.3456626
7. Giduthuri A. T., Theodossiou S. K., Schiele N. R., Srivastava S. K. Dielectrophoresis as a tool for electrophysiological characterization of stem cells // *Biophysics Reviews*. 2020. Vol. 1. N. 1. P. 011304. DOI: 10.1063/5.0025056
8. Hoettges K. F. Dielectrophoresis as a cell characterisation tool // *Microengineering in Biotechnology*. 2010. Vol. 583. P. 183-198. DOI: 10.1007/978-1-60327-106-6\_8
9. Lorenz M., Malangré D., Du F., Baune M., Thöming J., Pesch G. R. High-throughput dielectrophoretic filtration of sub-micron and micro particles in macroscopic porous materials // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2020. Vol. 412. P. 3903-3914. DOI: 10.1007/s00216-020-02557-0
10. Pesch G. R., Du F. A review of dielectrophoretic separation and classification of non-biological particles // *Electrophoresis*. 2021. Vol. 42. N. 1-2. P. 134-152. DOI: 10.1002/elps.202000137
11. Lorenz M., Weber A. P., Baune M., Thöming J., Pesch G. R. Aerosol classification by dielectrophoresis: a theoretical study on spherical particles // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. N. 1, 10617. DOI: 10.1038/s41598-020-67628-9
12. Nieminen T. A., Knöner G., Heckenberg N. R., Rubinsztein-Dunlop H. Physics of optical tweezers // *Methods in Cell Biology*. 2007. Vol. 82. P. 207-236. DOI: 10.1016/S0091-679X(06)82006-6
13. Guo H. L., Li Z. Y. Optical tweezers technique and its applications // *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*. 2013. Vol. 56. P. 2351-2360. DOI: 10.1007/s11433-013-5355-3
14. Pohl H. A. The motion and precipitation of suspensions in divergent electric fields // *Journal of Applied Physics*. 1951. Vol. 22. N. 7. P. 869-871. DOI: 10.1063/1.1700065
15. Mhatre S. Dielectrophoretic motion and deformation of a liquid drop in an axisymmetric non-uniform AC electric field // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017. Vol. 239. P. 1098-1108. DOI: 10.1016/j.snb.2016.08.059
16. Mhatre S., Thaokar R. M. Drop motion, deformation, and cyclic motion in a non-uniform electric field in the viscous limit // *Physics of Fluids*. 2013. Vol. 25. N. 7. P. 072105. DOI: 10.1063/1.4813236
17. Зайковский В. В., Харламов С. Н., Муратов В. М. Экспериментальное исследование движения капель воды в водонефтяной эмульсии при разделении в неоднородном электрическом поле // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016. Т. 327. №. 10. С. 22-34.
18. Velev O. D., Gangwal S., Petsev D. N. Particle-localized AC and DC manipulation and electrokinetics // *Annual Reports Section C (Physical Chemistry)*. 2009. Vol. 105. P. 213-246. DOI: 10.1039/B803015B
19. Schiller L., Naumann A. Z. Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung // *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*. 1933. Vol. 77. P. 318-320.

## References

- Saad M. A., Kamil M., Abdurahman N. H., Yunus R. M., Awad O. I. An overview of recent advances in state-of-the-art techniques in the demulsification of crude oil emulsions. *Processes*, 2019, vol. 7, no. 7, 470. DOI: 10.3390/pr7070470
- Eow J. S., Ghadiri M., Sharif A. O., Williams T. J. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding. *Chemical Engineering Journal*. 2001, vol. 84, no. 3, pp. 173-192. DOI: 10.1016/S1385-8947(00)00386-7
- Eow J. S., Ghadiri M. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. *Chemical Engineering Journal*, 2002, vol. 85, no. 2-3, pp. 357-368. DOI: 10.1016/S1385-8947(01)00250-9
- Cottrell F. G., Speed J. B. Separating and collecting particles of one liquid suspended in another liquid. United States patent US987115A. Patented March 21, 1911.
- Mhatre S., Vivacqua V., Ghadiri M., Abdullah A. M., Al-Marri M. J., Hassanpour A., Kermani B. Electrostatic phase separation: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, vol. 96, pp. 177-195. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.02.012
- Pethig R. Dielectrophoresis: Status of the theory, technology, and applications. *Biomicrofluidics*, 2010, vol. 4, no. 2, 022811. DOI: 10.1063/1.3456626
- Giduthuri A. T., Theodossiou S. K., Schiele N. R., Srivastava S. K. Dielectrophoresis as a tool for electrophysiological characterization of stem cells. *Biophysics Reviews*, 2020, vol. 1, no. 1, 011304. DOI: 10.1063/5.0025056
- Hoettges K. F. Dielectrophoresis as a cell characterisation tool. *Microengineering in Biotechnology*, 2010, vol. 583, pp. 183-198. DOI: 10.1007/978-1-60327-106-6\_8
- Lorenz M., Malangré D., Du F., Baune M., Thöming J., Pesch G. R. High-throughput dielectrophoretic filtration of sub-micron and micro particles in macroscopic porous materials. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2020, vol. 412, pp. 3903-3914. DOI: 10.1007/s00216-020-02557-0
- Pesch G. R., Du F. A review of dielectrophoretic separation and classification of non-biological particles. *Electrophoresis*, 2021, vol. 42, no. 1-2, pp. 134-152. DOI: 10.1002/elps.202000137
- Lorenz M., Weber A. P., Baune M., Thöming J., Pesch G. R. Aerosol classification by dielectrophoresis: a theoretical study on spherical particles. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, 10617. DOI: 10.1038/s41598-020-67628-9
- Nieminen T. A., Knöner G., Heckenberg N. R., Rubinsztein-Dunlop H. Physics of optical tweezers. *Methods in Cell Biology*, 2007, vol. 82, pp. 207-236. DOI: 10.1016/S0091-679X(06)82006-6
- Guo H. L., Li Z. Y. Optical tweezers technique and its applications. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2013, vol. 56, pp. 2351-2360. DOI: 10.1007/s11433-013-5355-3
- Pohl H. A. The motion and precipitation of suspensions in divergent electric fields. *Journal of Applied Physics*, 1951, vol. 22, no. 7, pp. 869-871. DOI: 10.1063/1.1700065
- Mhatre S. Dielectrophoretic motion and deformation of a liquid drop in an axisymmetric non-uniform AC electric field. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, vol. 239, pp. 1098-1108. DOI: 10.1016/j.snb.2016.08.059
- Mhatre S., Thaokar R. M. Drop motion, deformation, and cyclic motion in a non-uniform electric field in the viscous limit. *Physics of Fluids*, 2013, vol. 25, no. 7, pp. 072105. DOI: 10.1063/1.4813236
- Zaykovskiy V. V., Kharlamov S. N., Muratov V. M. Experimental study of water-in-oil emulsion destabilization in nonuniform electric field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 22-34 (In Russian).
- Velev O. D., Gangwal S., Petsev D. N. Particle-localized AC and DC manipulation and electrokinetics. *Annual Reports Section C (Physical Chemistry)*, 2009, vol. 105, pp. 213-246. DOI: 10.1039/B803015B
- Schiller L., Naumann A. Z. Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung [On basic calculations in gravity separation]. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 1933, vol. 77, pp. 318-320. (In German).

### Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Шмыров А. В., Мошева Е. А., Мизев А. И., Сираев Р. Р. Динамика водомасляной эмульсии в неоднородном высокочастотном электрическом // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 2. С. 22–35. doi: 10.17072/1994-3598-2023-2-22-35

### Please cite this article in English as:

Shmyrov A. V., Mosheva E. A., Mizev A. I., Siraev R. R. A water-oil emulsion dynamics in an inhomogeneous high-frequency electric field. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 2, pp. 22–35. doi: 10.17072/1994-3598-2023-2-22-35

**Сведения об авторах**

1. *Андрей Викторович Шмыров*, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.
2. *Елена Александровна Мошева*, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013
3. *Алексей Иванович Мизёв*, д-р. физ.-мат. наук, доцент, директор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.
4. *Рамиль Рифгатович Сираев*, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент, кафедра «Прикладная физика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ул. Комсомольский проспект, 29, Пермь, 614990

**Author information**

1. *Andrey V. Shmyrov*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
2. *Elena A. Mosheva*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
3. *Alexey I. Mizev*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
4. *Ramil R. Siraev*, Candidate of the Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Applied Physics, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia.