 © Авторы статьи / Authors of the article

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ/INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.13 EDN: GIKDFU

СТРУКТУРНАЯ АГРЕГАЦИЯ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Научная статья

Шабалин В.В.[1, *]
[1] ORCID : 0000-0002-8168-2343;
[1] Санкт-Петербургский Архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (vvshabalin[at]mail.ru)

Предложена: 30.09.2022; Принята: 31.10.2022; Опубликована: 16.12.2022

Аннотация

Введение. В составе питьевой воды в системе водоснабжения Санкт-Петербурга присутствуют наночастицы различных типов, в том числе и SiO_2, которые появляются в ее составе в процессе транспортировки по водопроводу к потребителю. Данный факт, а также нарастающее ухудшение экологической обстановки в целом требует совершенствования существующих методов очистки питьевой воды. В этом отношении могут быть использованы методы, позволяющие с помощью постоянных и переменных электрических полей локализовать и агрегировать наночастицы внутри определенной области жидкой среды, что обеспечит более высокое качество её очистки. Материалы и методы. Анализ транспорта и агрегации наночастиц был проведен в капле природной воды, лежащей на стеклянной подложке, при воздействии на неё неоднородного электрического поля разных направлений. Агрегация и пространственное распределение наночастиц в водной среде происходило под действием диэлектрофоретических сил. Определялась зависимость времени и места структуризации растворённых частиц от характеристик электрического поля, размеров капли и концентрации наночастиц. При этом использовались: методы оптического анализа течений частиц и распознавания изображений (видео- и фоторегистрация микроскопических изображений). Результаты. Установлено, что действие электрических сил вызывает перераспределение и агрегацию частиц в периферической и центральной зонах капли. Показано, что частицы, которые обладают большей электропроводимостью, чем вода, связываются друг с другом посредством диполь-дипольных взаимодействий. Направление и напряженность электрического поля определяли форму и положение агрегаций наночастиц.

Ключевые слова: диэлектрофорез, транспорт наночастиц в растворах, агрегация, экспериментальное моделирование.

THE STRUCTURAL AGGREGATION OF MICRO- AND NANOPARTICLES IN NATURAL WATERS UNDER THE IMPACT OF AN ELECTRIC FIELD

Research article

Shabalin V.V.[1, *]
[1] ORCID : 0000-0002-8168-2343;
[1] Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (vvshabalin[at]mail.ru)

Suggested: 30.09.2022; Accepted: 31.10.2022; Published: 16.12.2022

Abstract

Introduction. Drinking water in the water supply system of St. Petersburg contains nanoparticles of different types, including SiO2, which appear in its composition during transportation through the water pipeline to the consumer. This fact, as well as the increasing deterioration of the ecological situation in general, requires improvement of existing methods of drinking water treatment. In this regard, methods allowing by means of constant and oscillating electric fields to localize and aggregate nanoparticles inside a certain area of a liquid environment, which will provide a higher quality of its purification, can be used. Materials and methods. Nanoparticle transport and aggregation were analyzed in a drop of natural water lying on a glass substrate under the influence of a heterogeneous electric field of different directions. Aggregation and spatial distribution of nanoparticles in the aqueous environment was carried out under the influence of dielectrophoretic forces. The dependence of time and place of structurization of dissolved particles on the characteristics of the electric field, drop size and nanoparticles concentration was determined. The methods of optical analysis of particle flows and image recognition (video and photo registration of microscopic images) were used. Results. It was established that the action of electric forces causes redistribution and aggregation of particles in the peripheral and central zones of the drop. It was shown that the particles, having higher electric conductivity than water, bind to each other by dipole-dipole interactions. The direction and strength of the electric field determined the shape and position of the nanoparticle aggregations.

Keywords: dielectrophoresis, nanoparticle transport in solutions, aggregation, experimental simulation.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Введение

Фильтрация микро- и наночастиц в водных растворах, является важной технологической задачей, поскольку они присутствуют в больших количествах в составе питьевой воды в результате промышленных и бытовых выбросов [1], [2]. Существующие методы очистки питьевой воды от микро- и наночастиц имеют серьёзные недостатки. Так, флотационная сепарация медленно отделяет наночастицы разного типа и даже приводит к дополнительному загрязнению. Методы светового воздействия на среду вызывают ее значительный нагрев, что приводит лишь к деструкции и слабо удаляют примеси. Эти методы требуют использования оптического оборудования больших размеров [1], [3], [4].

Цель настоящей работы состояла в исследовании воздействия электрических полей на транспорт наночастиц в водном растворе, выделения наночастиц из раствора в виде отдельных структур с последующей их агрегацией. Это позволит быстро выделить примеси из раствора и добиться удовлетворительного качества очистки питьевой воды от такого типа загрязнителей.

В настоящее время методы, использующие воздействие электрического поля на водную среду, содержащую загрязнения, становятся актуальными [4], [5]. Эти методы в первую очередь основываются на явлении диэлектрофореза (DEP). Этот термин впервые введён в 1951 году Гербертом А. Полом [7] для описания движения диэлектрических частиц при взаимодействии с неоднородным электрическим полем. Методы, использующие DEP, нашли широкое распространение:

- при анализе микропотоков в жидкостях [6], [8], [9]; в биосенсорах [10], [11];
- при исследованиях окружающей среды [12], [13] и в медицинской диагностике [14], [15].

Движение частиц в DEP основано на различии поляризуемости между частицами и окружающей средой [16], [17], [18] в неоднородном электрическом поле.

Сила, действующая на сферическую частицу $\vec{F}_{DEP}$ в неоднородном электрическом поле $\vec{E}$ вызывает движение частицы в направлении градиента или против него, что зависит от величины поляризации частиц, по сравнении со средой, в которой она находится $\vec{F}_{DEP} = \vec{p} \cdot \nabla \vec{E}$. Важно отметить, что частицы испытывают силу DEP только в неоднородном электрическом поле. В случае переменного электрического поля, возникает зависящий от частоты поля эффективный дипольный момент $\vec{p}_{\text{эфф}}(\omega)$ и в представлении Джонса [22] $\vec{p}_{\text{эфф}}(\omega) = 4\pi\varepsilon_m K(\omega) r^3 \vec{E}$, позволяет вычислить силу , действующую на сферическую частицу с радиусом *r*, где $K(\omega)$ фактора Клаузиуса-Моссотти, определенный для сферических частиц с учетом формулировок Лоренца [27], [28]. В неоднородных полях сила для сферической частицы [24], [25], определяется [19], [20], [21], [26]:

$$\vec{F}_{DEP} = \pi r^2 \varepsilon_m Re[K(\omega)] \nabla |\vec{E}|^2 \tag{1}$$

В наших исследованиях DEP эффекты приводили к структурированию частиц, когда концентрация частиц составляла 1.0 г/100 мл и более. Воздействие электрического поля проявляло своё действие как на транспорт частиц раствора, так и на адсорбцию их на подложке. Диполи, наведенные в частицах, взаимодействуют друг с другом, если частицы расположены достаточно близко. Это приводит к слипанию частиц за счёт сил межмолекулярного взаимодействия, в результате формировались агрегаты, состоящие как из крупных, так и более мелких частиц. Увеличение размера и массы агрегатов приводило к уменьшению числа частиц в объёме раствора. Для этого мы учитывали дипольную коагуляцию за счет силы, действующую на частицы-диполи [29]

$$\vec{F}_C = \frac{3}{2}\pi\varepsilon_m r^2 (\frac{2r}{l})^4 E^2 \vec{e}_n \tag{2}$$

где *l* - расстояние между диполями, *r* - радиус частицы, $\vec{e}_n$ - представляет собой единичный вектор, нормальный к поверхности, на которую оседают частицы Эта сила пропорциональна квадрату амплитуды электрического поля, и она отсутствует если $\vec{E} > \vec{E}_{\text{крит}}$. Сила сцепления $\vec{F}_C$, действующая на частицы с аналогичными электрическими свойствами, всегда положительна и является силой притяжения. Частицы одного и того же типа всегда выстраиваются вдоль линий поля, независимо от того, выше или ниже их поляризуемость, чем в среде, в то время как смеси частиц с более низкой и более высокой поляризуемостью, чем среда, могут образовывать различные типы чередующихся цепочек в перпендикулярном направлении.

Кроме силы $\vec{F}_C$ необходимо учитывать обобщенную силу между гравитационной силой и силой плавучести, действующей на частицу [16], которая имеет следующий вид:

$$\vec{F}_G = \frac{4}{3}\pi r^3 (\varrho_p - \varrho_m)\vec{g} \tag{3}$$

где ρ_p и ρ_m относятся к плотности частицы и среды соответственно, а $\vec{g}$ – постоянная гравитационного ускорения.

Существуют и другие силы, которые могут влиять на эффект DEP, но они в основном связаны с резистивным нагревом жидкости и проявляются при очень больших значениях $\vec{E}$. В работе мы ими пренебрегали.

После включения электрического поля в капле медленно появлялись потоки. Для многофазных систем действие вышеперечисленных сил поток $\vec{J}_i$ для компонента *i* с концентрацией c_i определяется выражением [30]:

$$\vec{J} = -D\nabla c + c\vec{u} + c\vec{u}_{DEP} \tag{4}$$

где *D* - коэффициент диффузии, *c* - концентрация молекул. Первый член в правой части уравнения (5) соответствует диффузии, второй означает конвективный перенос, третий описывает движение частиц вдоль линий

 © Авторы статьи / Authors of the article

напряжённости электрического поля. Движение за счёт DEP механизма происходит по градиенту напряжённости электрического поля со скоростью [31]:

$$\vec{u}_{DEP} = \mu_{DEP}\nabla(\vec{E}\cdot\vec{E}) = \frac{\pi r_p^2 \varepsilon_m}{3\eta} K(\omega)\nabla(\vec{E}\cdot\vec{E}) \quad (6)$$

Кроме вышеуказанных скоростей нужно учесть величину скорости из-за силы тяжести, включая сопротивление Стокса, для сферических частиц, $\vec{u}_g$, составляет

$$\vec{u}_g = \frac{2r_p^2}{9\eta}|\varrho_p - \varrho_m|\vec{g} \quad (8)$$

Материалы и методы

Материалами исследования являлись водные растворы с частицами кварца SiO_2, размером 10 – 200 нм. Частицы SiO_2 представляют собой сферические частицы белого цвета. По данным производителя, доля частиц с размерами 20 − 40 нм составляет около 7 − 30 % от общей массы порошка, а с размерами 50 нм – менее 3 %. [32].

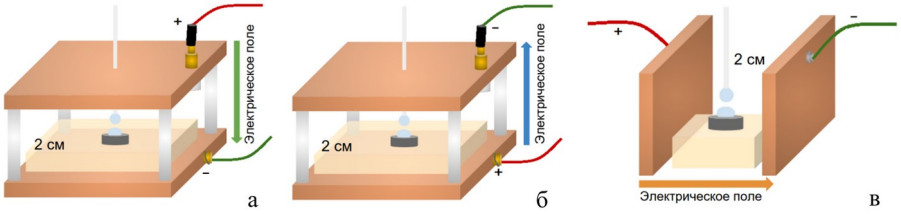

Рисунок 1 - Экспериментальная установка с тремя видами расположения электродов и разным направлением напряженности электрического поля :
а, б - вертикальное направление; *в* - горизонтальное
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.13.1

В наших исследованиях мы наблюдали за движением частиц внутри капли, лежащей на твёрдой стеклянной подложке. Измеряли её форму и размеры с помощью видеокамеры, закреплённой в горизонтальной плоскости. Эксперименты проводились в квадратной стеклянной кювете (10×10×30 мм^3), в которой с двух сторон сделаны прозрачные стенки, позволяющие наблюдать каплю как параллельно, так и перпендикулярно приложенному электрическому полю. Стеклянная ячейка оснащена соответствующими вертикальными (рис. 1 а, б) и горизонтальными медными электродами (рис. 1 в) для трех направлений напряженности электрического поля.

Положительные и заземляющие электроды изготовлены из меди и расположены на расстоянии 2 см между и ними. Стеклянный материал удобен, так как он не мешает электрическому полю, генерируемому внутри ячейки, и обеспечивает максимальную зону обзора, которую может захватывать камера. Горизонтально расположенные медные электроды предназначены для создания вертикального направления электрического поля (в прямом и обратном направлении $\vec{E}$, в то время как вертикальные медные электроды создают горизонтальное электрическое поле. Экспериментальная установка также включает в себя компьютер (ноутбук), капиллярную трубку, пипетка с дозатором, цифровую камеру высокого разрешения (CCD), источника питания высокого напряжения (ВН) и ячейки с электродами. Видеоизображения регистрировались на карту MicroSD, фотоизображения и обрабатывались с помощью программного обеспечения Image Pro Plus 6.0 фирмы Media Cybernetics [33], [34]. Цифровая камера записывает (вид сверху) области с каплей с частотой 50 кадров в секунду для наблюдения за динамикой движения контактной линии капли. Наблюдения за процессом высыхания капли и позволило нам получить изображения 1280×720 пикселей на площади 20.5×11.3 мм^2. При этом при увеличениях 10 – 20х мы наблюдали изменение краевого угла капли, радиуса капли и высоты в центральной части капли, что позволяло последовательно визуализировать картины течений вблизи свободной поверхности, на полувысоте и около подложки уже в капле высотой около 1 мм.

Для создания электрического поля компактный высоковольтный источник питания. Общее выходное напряжение этой модели составляет от 0 до 2 кВ. Кабель заземления подсоединяется к одному электроду, а положительный (токовый) кабель подсоединяется к противоположному электроду. Источник питания ВН заземляется в лаборатории с помощью приставки с плавающим заземлением.

Компьютерная обработка и анализ данных о структуре микротечений в капле и распределении компонент в капле проводилась с помощью программного пакета Mathematica 13.1 (Wolfram Research), включающего математическую обработку изображений.

Результаты и обсуждение

Капля раствора была помещена в электрическое поле с разным направлением вектора напряжённости как показано на рис. 2. В верхнем ряду (I) электрическое поле направлено вдоль подложки, тогда как в нижнем ряду (II) поле направлено перпендикулярно подложке. Электрическое поле было постоянным напряжённостью 50 В/мм. Изменения наблюдались спустя 20 с. после включения поля и приблизительно через 120 с. капля становилась прозрачной. В случае (I) после начального состояния капли, в котором компоненты раствора были равномерно распределены по объёму капли наблюдалось движение компонентов к центру капли с образованием устойчивой структуры в виде ленты посередине капли.

 © Авторы статьи / Authors of the article

После выключение электрического поля эта структура медленно разрушалась. Ширина ленты зависела от начальной концентрации частиц в капле и для электрического поля уже 50 В/мм и концентрации 1.0 г/100 мл лента почти занимала почти весь диаметр капли, в то время как для 0.5 г/100 мл лента была узкой. Предполагая, что большинство частиц мигрировало в ленту для капли с такой концентрацией её размер составлял 2.3 мм. В случае (II) подобной структуры не наблюдалось, но очень быстро компоненты раствора смещались к периферии капли и капля становилась более прозрачной в центре.

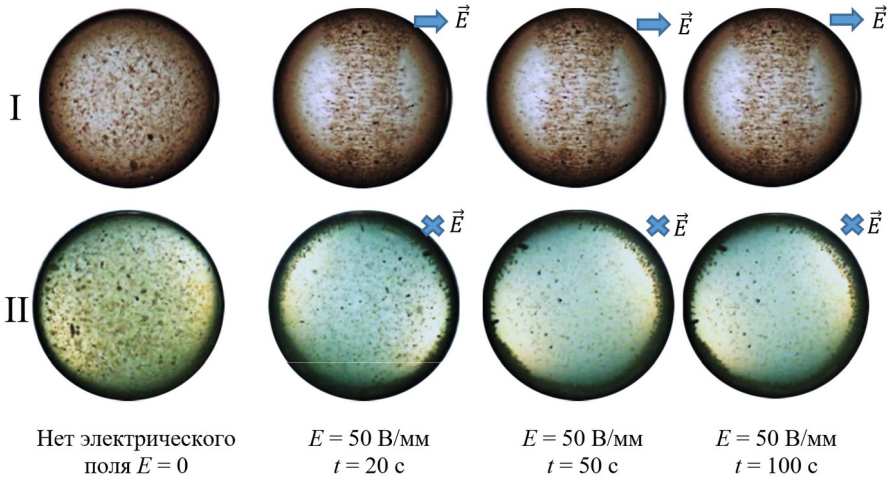

Рисунок 2 - Формирование центральных и периферических зон в капле раствора с SiO_2, в постоянном электрическое поле:
I - направление электрического поля вдоль подложки; *II* - направление электрического поля перпендикулярно подложке
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.13.2

Примечание: радиус капли 2.7 мм; направление отмечено стрелкой и крестом

В случае переменного электрического поля (рис. 3) формирование ленты начиналось уже с частоты 0.1 кГц. При возрастании частоты до 1 кГц и более ширина кольца увеличивалась на 70%. Мы считаем, что это происходит за счет комбинированного действия диполь-дипольных взаимодействий. Было замечено, что большие частицы, уже адсорбированные на границе капли, могут мигрировать к «экватору» или «полюсам» капли, когда включали переменное электрическое поле. Это происходит вследствие поляризации частиц и действия на них сил в областях неоднородности поля, которые пропорциональным градиенту квадрата напряжённости.

Выражение (1) для $\vec{F}_{\mathrm{DEP}}$, действительно при условии, что размер поляризованной частицы является малым по сравнению с размерами неоднородности электрического поля. В наших исследованиях неоднородность электрического поля в капле задана размером капли R_d, мы использовали R_d = 5 – 9 мм, а размер частиц (радиус частицы *r*) кварца SiO_2, находится в диапазоне менее 0.2 мкм. В таком случае мы полагаем $\sigma_p \gg \sigma_s$ и $\nabla\vec{E}^2 \approx E^2/R_d$, тогда $|\vec{F}_{\mathrm{DEP}}| \approx \varepsilon\varepsilon_0 r E^2/R_d$. Баланс между гидродинамическим переносом $\approx \eta r_p$ и силой $\vec{F}_{\mathrm{DEP}}$ дает диаэлектрофоретическую скорость $u_{DEP} \approx |\vec{F}_{DEP}|/\eta r_p$.

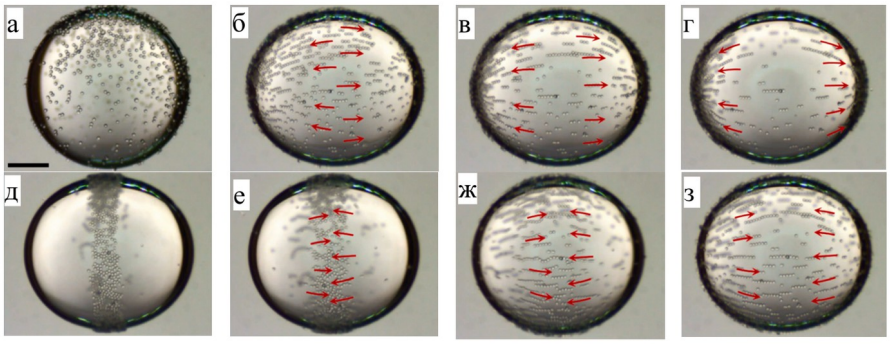

Рисунок 3 - Формирование центральных и периферических зон в капле раствора наночастиц SiO_2, в переменном электрическое поле
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.13.3

Примечание: большинство частиц находятся на границе раздела, рассеяны случайным образом (а). Напряженность электрическогополя составляла 60 В/мм, а частоту регулировалась между 100 Гц (б-г), 500 Гц (д, е) и 1 кГц (ж, з).

 © Авторы статьи / Authors of the article

Регулируя частоту электрического поля, можно изменить расположение частиц на поверхности. Масштабная линейка составляет 1 мм, а радиус капли около 7 мм

Таким образом, частицы, которые двигались в направлении потока, и приблизившись к периферии капли, и, перед абсорбированием на подложке, начинали двигаться в противоположном направлении, при этом их скорость адсорбции была не постоянной.

Механизм действия переменного электрического поля (направление электрического поля перпендикулярно подложке) проявился в том, что наблюдалось заметное изменение (рис. 4) в распределении компонент раствора в капле в горизонтальной плоскости, перпендикулярной направлению действия поля.

Рисунок 4 - Динамика (кадры видеозаписи) формирования центральных структур в капле раствора наночастиц SiO_2 при помещении её в переменной электрическое поле с направлением перпендикулярно подложке
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.13.4

Примечание: радиус капли 5.8 мм; частота изменения поля 5 кГц, и амплитуда 30 В/мм

Для капель, подвергнутых действию высокочастотного переменного поля тока, мы наблюдали перемещение компонент раствора и к периферии капли, и к её центру. В этом случае одними только дипольными взаимодействиями не объяснить такое поведение, и возможно здесь наблюдается «электроконвекция», а дипольные взаимодействия молекул приводят к координации частиц, что увеличивало уровень адсорбции у границы капли.

Действие электрического поля на раствор приводит к его нагреву за счёт потерь электрической энергии в растворе. Мы это объясняем градиентом напряжённости электрического поля, вызванного за счёт движение свободных (электропроводность) и связанных (поляризация) электрических зарядов, что приводит к потере электрической энергии на выделение тепла в растворе. А это в свою очередь запускает направленный термодиффузионный перенос массы в растворе (диффузия и теплопроводность) и способствует повышению процессов конвекции.

Проведенные исследования показали, что время структуризации частиц (рис. 5 и 6)в центральной и периферической области капли уменьшается с увеличением напряженности электрического поля, вплоть до некоторого критического напряжения. Эти напряжения являются специфическими для каждого отдельного случая, в частности, при напряжении источника изменяются от 0.25 кВ до 1.5 – 2 кВ. При напряжении источника < 0.25 кВ наблюдалось отсутствие структуризации частиц, поскольку напряженность электрического поля недостаточна при этих напряжениях для того, чтобы повлиять на время структуризации частиц (t_S). При напряженности более 1.25 кВ уменьшение t_S происходило за счет сильного взаимодействия между поверхностями частиц после воздействия электрического поля.

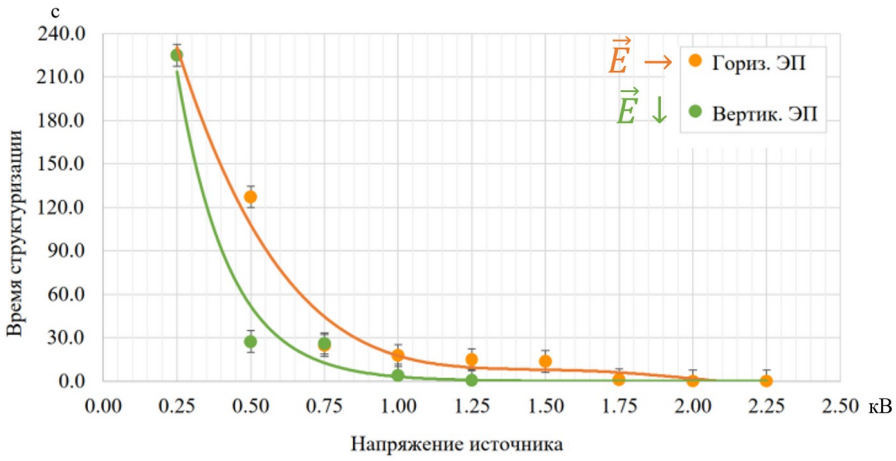

Рисунок 5 - График зависимости времени структуризации tS от напряжения источника U для горизонтального и вертикального направлений напряженности электрического поля
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.13.5

Примечание: E→ и E↓

 © Авторы статьи / Authors of the article

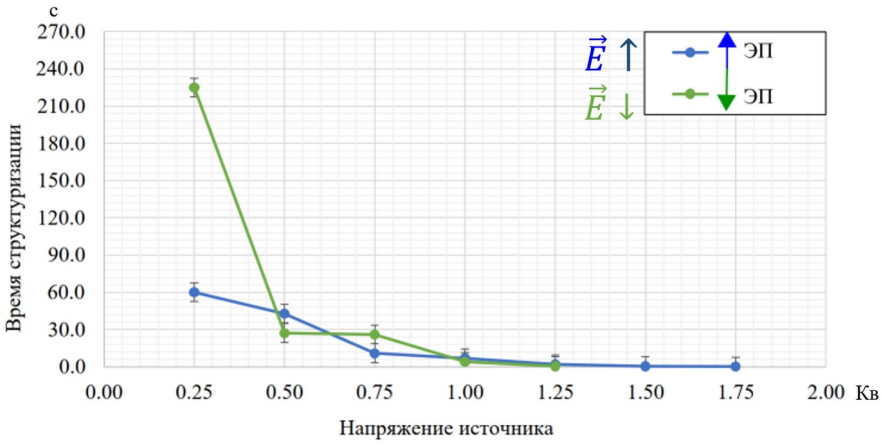

Рисунок 6 - График зависимости времени структуризации t_S от напряжения источника U для двух противоположных направлений напряженности электрического поля
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.13.6

Примечание: E↑ и E↓

Вид зависимости времени структуризации t_S от напряжения источника U был схожим для двух противоположных направлений действия электрического поля на каплю, и в случае поперечных (горизонтальное электрическое поле) электродов и параллельных (вертикально электрическое поле) электродов (рис. 5).

Видно, что линии зависимости t_S от U для двух направлений вектора напряженности электрического поля ($\vec{E}\rightarrow$ и $\vec{E}\downarrow$) не сильно отличаются. Заметная разница наблюдалась лишь в диапазоне 0.5 – 0.75 кВ. Однако линия тренда для горизонтального направления поля немного смещена влево, это означает, что напряженность электрического поля, необходимая для достижения более быстрого t_S, лежит ниже. Следовательно, приложение электрического поля в том же направлении, что и горизонтальные транспортные потоки в капле, незначительно увеличивают t_S, но это происходит только при U < 1 кВ и не столь критично.

Следующим этапом исследований явилось изменение направления приложения электрического поля. Тем самым было проверено, влияет ли сила тяжести $\vec{F}_G$ на процесс агрегации частиц и время структуризации на подложке капли в совместном действии с . Все остальные параметры оставались постоянными, капли были помещены в середину области электрического поля размером 2 см, но были переключены соединения положительного и заземляющего проводов.

В целом, изменение направления приложения электрического поля не демонстрирует значительных различий между линиями времени структуризации частиц в капле при более высоких значениях приложенного напряжения (рис. 6). На основании этих данных можем сделать вывод, что доминирующей силой является электрическая сила при U > 0.75 кВ. Значительные отклонения в зависимости t_S от U из-за силы тяжести произошли при более низких значениях напряжения источника электрического поля (менее 0.5 кВ). В случае более высокого напряжения источника слабо влияло на время структуризации при любом направлении вертикального электрического поля ($\vec{E}\uparrow$ и $\vec{E}\downarrow$) . Поэтому более высокие значения напряженности электрического поля не будут эффективны в системах, требующих разделения фаз.

В процессе эксперимента к каплям прикладывали электрическое поле в течение 120 с. Изменение времени действия электрического поля (t_D) варьировалось при трех различных значениях напряженности электрического поля, соответствующих разным U (рис. 7).

На рис. 7 показаны линии зависимости t_S от t_D в вертикальном электрическом поле ($\vec{E}\downarrow$) для трех напряжений источника электрического поля U: 0.5 кВ; 1.0 кВ; 1.25 кВ. Как показано на рисунке, линии тренда не сильно различаются в диапазоне различного времени t_D при 0 с, 15 с, 30 с, 60 с или 120 с. Колебания в основном связаны с систематическими ошибками в эксперименте. Это может включать действие электрического поля на изменение формы капли при приложении электрического поля в течение более длительного времени. По-видимому, существует небольшая корреляция между точками данных при этих напряжениях, однако расположение линий тренда при разных U подтверждает, что напряженность электрического поля сокращает время t_S. Линия тренда для данных при напряжении U = 0.5 кВ показывает диапазон изменения t_S от 60.0 до 120.0 секунд, который снижается до ~ 10.0 – 30.0 секунды при более высоком напряжении 1.25 кВ.

Параметр концентрация частиц в растворе МЖ значительно влияет на время структуризации из-за повышенной вязкоупругости между частицами, что также фиксировалось в экспериментах. Были рассмотрены две концентрации частиц – 5 г/л и 15 г/л. Наблюдали их поведение в капле при различных значениях напряжения источника U(рис. 8). Как видно у зависимости t_S от U для 5 г/л, наблюдается сдвиг в правую сторону по сравнению с зависимостью при 1.0 г/100 мл, показывая, что процессы структуризации для1.0 г/100 мл достигаются намного раньше, около 0.5 кВ, до того, как время структуризации не уменьшится до минимального значения.

 © Авторы статьи / Authors of the article

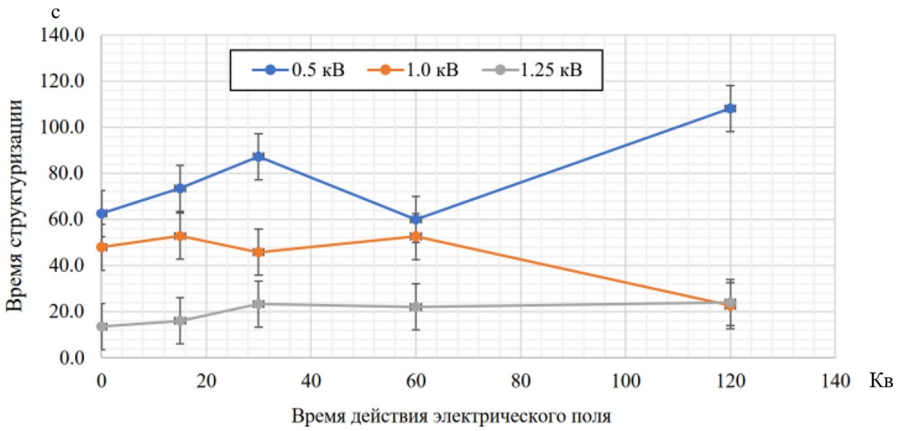

Рисунок 7 - График зависимости времени структуризации t_S от времени действия электрического поля t_D при трех напряжениях источника U для вертикального направления напряженности электрического поля
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.13.7

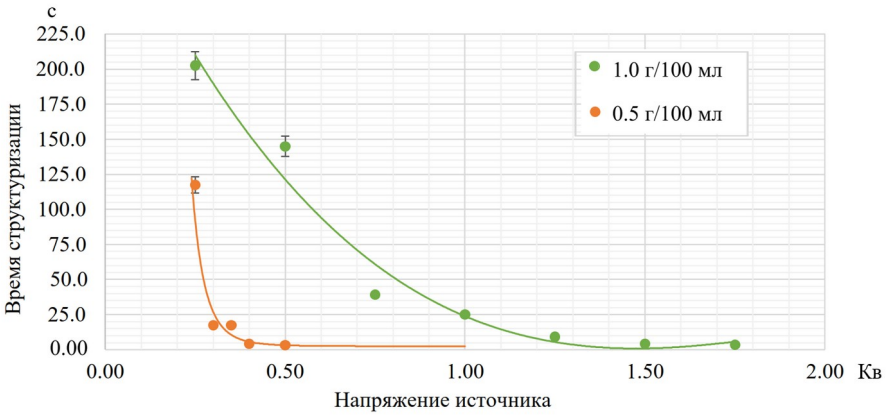

Рисунок 8 - График зависимости времени структуризации t_S от напряжения источника U для вертикального направления напряженности электрического поля
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.13.8

Для концентрации 0.5 г/100 мл, тот же минимум возникает при примерно в три раза большем напряжении источника, который, как показано, составляет около 1.5 кВ. Это интересное соотношение, поскольку меньшая концентрация частиц 0.5 г/100 мл составляет 1/3 концентрации более высокой концентрации 1.0 г/100 мл.

Размер капель – важный параметр, который напрямую влияет на время агрегации, так как более крупная капля вызовет уменьшение межфазного взаимодействия из-за распределения давления капли. Исследования показали, что чем больше радиусы капель, тем ниже значение критического электрического поля, что указывает на то, что более крупные капли также легче, деформируются, снижая межфазное натяжение в электрическом поле. Следовательно, поверхность капли легче деформируется, притягивая частицы в межфазном слое, тем самым еще больше усложняя процесс агрегации.

 © Авторы статьи / Authors of the article

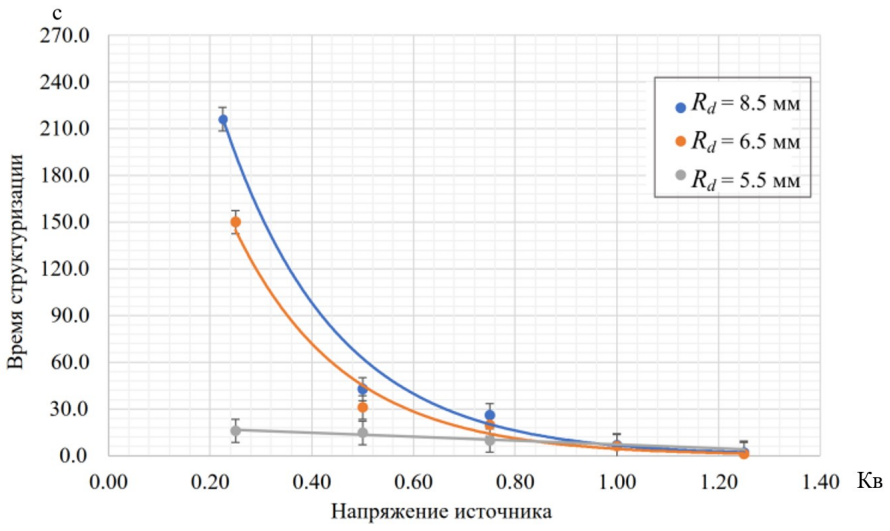

Рисунок 9 - График зависимости времени структуризации t_S от напряжения источника U в центре капли от радиуса капли для вертикального направления напряженности электрического поля
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.13.9

Как показано на (рис. 9) капля с радиусом 8.5 мм имеет наибольшее время структуризации, в то время как в более мелких каплях центральные структуры образовывались быстрее, для радиуса капли менее 5.5 мм время t_S < 20 с. Меньшее время t_S для капель с R_d > 3 мм наблюдалось при более высокой напряженности электрического поля.

Заключение

Таким образом, исследование воздействия неоднородных электрических полей на транспорт наночастиц в водном растворе показало возможность очистки воды от такого типа загрязнителей. При этом наблюдалось выделение наночастиц из раствора в виде отдельных структур разной формы с последующей их агрегации на стеклянной подложке. Использование такого метода для очистки воды от загрязнителей позволяет быстро и эффективно добиться удовлетворительного качества очистки питьевой воды, путем разделения примесей в неоднородных электрических полях. Это вызывает потребность в разработке соответствующих инновационных технологиях.

Наши исследования показали следующее:

1) электрические поля могут вызывать структурную сборку взвешенных в капле МЖ наночастиц, которые под действием сил DEP могут концентрироваться в определённых зонах. Это, по нашему мнению, может объясняться электрогидродинамическими циркуляционными потоками внутри капли и дипольным взаимодействие между частицами;

2) ширина этих зон может активно контролироваться силой электрического поля, и мы показали, что сам этот эффект тесно связан с разницей амплитуд вектора поляризованности между частицами и самой средой, в которой они находятся;

3) исследуемые нами транспортные потоки выявили критическое значение напряженности электрического поля (в наших исследованиях оно составило около 0.75 кВ/см), при котором время структуризации было минимальным;

4) направление поля, действующего на капли (параллельное или перпендикулярное), не показало существенно различающихся результатов, но использовать установку с вертикальным направлением электрического поля оказалось предпочтительным за счет дополнительного движения под действием силы тяжести;

5) проведённые численные расчёты дают возможность более глубокого понимания эффектов DEP в пространственные распределения наночастиц, и показывают, что DEP может быть удобным методом концентрации и фракционирования частиц при различных исследовательских целях;

6) представленные теоретические и экспериментальные данные могут быть использованы при разработке новых методов очистки питьевой воды и других видов водных сред.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Lungu M. Some considerations on the dielectrophoretic manipulation of nanoparticles in fluid media / M. Lungu, A. Neculae, M. Bunoiu // J. of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2010. – № 12. – P. 2423-2426.

 © Авторы статьи / Authors of the article

2. Pethig R. Review article-dielectrophoresis: status of the theory, technology, and applications / R. Pethig // Biomicrofluidics. – 2010. – № 4(2). – P. 022811-1–02281-34. – DOI: 10.1063/1.3456626

3. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц. – Москва: Наука, 1982. – 620 с.

4. Zhang C. Dielectrophoretic platforms for bio-microfluidic systems / C. Zhang, K. Khoshmanesh, A. Mitchell // Anal. Bioanal. Chem. – 2010. – № 396(1). – P. 401–420. – DOI: 10.1007/s00216-009-2922-6

5. Crews N. An analysis of interdigitated electrode geometry for dielectrophoretic particle transport in micro-fluidics / N. Crews, J. Darabi, P. Voglewede et al. // Sensors and Actuators B. – 2007. – №12. – P. 672–679.

6. Driesche S. Continuous cell from cell separation by traveling wave dielectrophoresis / S. van den Driesche, V. Rao, D. Puchberger-Enengl et al. // Sensors and Actuators B. – 2012. – № 170. – P. 207–214.

7. Pohl H.A. The Motion and Precipitation of Suspensoids in Divergent Electric Fields / H.A. Pohl // J. Appl. Phys.. – 1951. – № 22. – P. 869–871. – DOI: 10.1063/1.1700065.

8. Xuan X. Particle focusing in microfluidic devices / X. Xuan, J. Zhu, C. Church // Microfluid. Nanofluid. – 2010. – № 9. – P. 1–16. – DOI: 10.1007/s10404-010-0602-7.

9. Zhang J. Real-time control of inertial focusing in microfluidics using dielectrophoresis (DEP) / J. Zhang, S. Yan, G. Alici et al. // RSC Adv. – 2014. – № 4. – P. 62076–62085. – DOI: 10.1039/C4RA13075H

10. Yang L.A. Review of multifunctions of dielectrophoresis in biosensors and biochips for bacteria detection / L.A. Yang // Anal. Lett. – 2012. – № 45. – P. 187–201. – DOI: 10.1080/00032719.2011.633182.

11. Tomkins M.R. Coupled cantilever-microelectrode biosensor for enhanced pathogen detection / M.R. Tomkins, J. Chow, Y. Lai et al. // Sens. Actuators B Chem. – 2013. – № 176. – P. 248–252. – DOI: 10.1016/j.snb.2012.09.020.

12. Švorc Ľ. Electrochemical sensor for environmental monitoring of pesticides: Determination of atrazine in river waters using a boron-doped diamond electrode / Ľ. Švorc, M. Rievaj, D. Bustin // Sens. Actuators B Chem. – 2013. – № 181. – P. 294–300. – DOI: 10.1016/j.snb.2013.02.036.

13. Lafleur J.P. Gold nanoparticle-based optical microfluidic sensors for analysis of environmental pollutants / J.P. Lafleur, S. Senkbeil, T.G. Jensen et al. // Lab Chip. – 2012. – № 12. – P. 4651–4656. – DOI: 10.1039/c2lc40543a

14. Cheng I.F. An integrated dielectrophoretic chip for continuous bioparticle filtering, focusing, sorting, trapping, and detecting / I.F. Cheng, H.C. Chang, D. Hou et al. // Biomicrofluidics. – 2007. – № 10-1(2). – P. 021503. – DOI: 10.1063/1.2723669

15. Adekanmbi E.O. Dielectrophoretic applications for disease diagnostics using lab-on-a-chip platform / E.O. Adekanmbi, S. Srivastava // Lab Chip. – 2016. – № 16. – P. 2148–2167. – DOI: 10.1039/C6LC00355A

16. Саранин В.А. Устойчивость равновесия, зарядка, конвекция и взаимодействие жидких масс в электрических полях / В.А. Саранин. – Ижевск: НИЦ РХД, 2009. – 332 с.

17. Morgan H. Separation of submicron bioparticles by dielectrophoresis / H. Morgan, M.P. Hughes, N.G. Green // Biophys. J. – 1999. – № 77. – P. 516–525. – DOI: 10.1016/S0006-3495(99)76908-0

18. Rosenthal A. Dielectrophoretic traps for single-particle patterning / A. Rosenthal, J. Voldman // Biophys. J. – 2005. – № 88. – P. 2193–2205. – DOI: 10.1529/biophysj.104.049684

19. Стишков Ю.К. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках / Ю.К. Стишков, А.А. Остапенко. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. – 172 с.

20. Bhattacharya S. Insulator-based dielectrophoretic single particle and single cancer cell trapping / S. Bhattacharya, T.C. Chao, A. Ros // Electrophoresis. – 2011. – № 32. – P. 2550–2558.

21. Pethig R. Review – Where Is Dielectrophoresis (DEP) Going? / R. Pethig // J. Electrochem. Soc. – 2016. – № 164. – P. B3049–B3055.

22. Jones T.B. Basic theory of dielectrophoresis and electrorotation / T.B. Jones // IEEE Eng. Med. Biol. Mag. – 2003. – № 22. – P. 33–42.

23. Benhal P. AC electric field induced dipole-based on-chip 3D cell rotation / P. Benhal, J.G. Chase, P. Gaynor et al. // Lab. A Chip. – 2014. – № 14. – P. 2717–2727.

24. Huang L. A cell electro-rotation micro-device using polarized cells as electrodes / L. Huang, W. He, W. Wang // Electrophoresis. – 2019. – № 40. – P. 784–791.

25. Pethig R. Limitations of the Clausius-Mossotti function used in dielectrophoresis and electrical impedance studies of biomacromolecules / R. Pethig // Electrophoresis. – 2019. – № 40. – P. 2575–2583.

26. Clausius R. Die mechanische Wärmetheorie, Zweiter Band. Abschnitt III: Behandlung dielectrische Medien, Friedrich Vieweg und Sohn / R. Clausius. – Braunschweig: Adamant Media Corporation, 1879. – P. 62–97.

27. Lorentz H.A. Ueber die Beziehung zwischen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes und der Körperdichte / H.A. Lorentz // Annalen der Physik. – 1880. – № 245. – P. 641–665.

28. Lorenz L. Ueber die Refractionsconstante / L. Lorenz // Annalen der Physik. – 1880. – № 247. – P. 70–103.

29. Jones T.B. Electromechnics of particles / T.B. Jones. – Cambridge : Cambridge University Press, 1996. – 285 p.

30. Мелчер Дж. Электрогидродинамика / Мелчер Дж. // Магнитная гидродинамика. – 1974. – № 2. – С. 3–30.

31. Григорьев А.И. Локальное увеличение напряженности однородного электростатического поля вблизи вершины сфероидальной капли / А.И. Григорьев, С.И. Щукин // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69. – Вып. 8. – С. 49–54.

32. Масалов В.М. Наноструктура частиц диоксида кремния, полученных многоступенчатым методом Штобера–Финка–Бона / В.М. Масалов, Н.С. Сухинина, Г.А. Емельченко // Химия, физика и технология поверхности. – 2011. – Т. 2. – № 4. – С. 373–384.

33. Захарова Г.П. Процессы структурообразования при клиновидной дегидратации простых и многокомпонентных растворов / Г.П. Захарова, В.В. Шабалин // Российская оториноларингология. – 2014. – № 6(73). – С. 31–37.

 © Авторы статьи / Authors of the article

34. Шабалин В.В. Биофизические механизмы формирования твердофазных структур биологических жидкостей человека: дис. ... докт. биол. наук: 03.01.02: защищена 31.05.18: утв. 27.11.18 / Шабалин Владимир Владимирович. – Санкт-Петербург, 2018. – 375 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Lungu M. Some considerations on the dielectrophoretic manipulation of nanoparticles in fluid media / M. Lungu, A. Neculae, M. Bunoiu // J. of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2010. – № 12. – P. 2423-2426.

2. Pethig R. Review article-dielectrophoresis: status of the theory, technology, and applications / R. Pethig // Biomicrofluidics. – 2010. – № 4(2). – P. 022811-1–02281-34. – DOI: 10.1063/1.3456626

3. Landau L.D. Jelektrodinamika sploshnyh sred [Continuous Media Electrodynamics] / L.D. Landau, E.M.Lifshic. – Moscow: Nauka, 1982. – 620 p. [in Russian]

4. Zhang C. Dielectrophoretic platforms for bio-microfluidic systems / C. Zhang, K. Khoshmanesh, A. Mitchell // Anal. Bioanal. Chem. – 2010. – № 396(1). – P. 401–420. – DOI: 10.1007/s00216-009-2922-6

5. Crews N. An analysis of interdigitated electrode geometry for dielectrophoretic particle transport in micro-fluidics / N. Crews, J. Darabi, P. Voglewede et al. // Sensors and Actuators B. – 2007. – №12. – P. 672–679.

6. Driesche S. Continuous cell from cell separation by traveling wave dielectrophoresis / S. van den Driesche, V. Rao, D. Puchberger-Enengl et al. // Sensors and Actuators B. – 2012. – № 170. – P. 207–214.

7. Pohl H.A. The Motion and Precipitation of Suspensoids in Divergent Electric Fields / H.A. Pohl // J. Appl. Phys.. – 1951. – № 22. – P. 869–871. – DOI: 10.1063/1.1700065.

8. Xuan X. Particle focusing in microfluidic devices / X. Xuan, J. Zhu, C. Church // Microfluid. Nanofluid. – 2010. – № 9. – P. 1–16. – DOI: 10.1007/s10404-010-0602-7.

9. Zhang J. Real-time control of inertial focusing in microfluidics using dielectrophoresis (DEP) / J. Zhang, S. Yan, G. Alici et al. // RSC Adv. – 2014. – № 4. – P. 62076–62085. – DOI: 10.1039/C4RA13075H

10. Yang L.A. Review of multifunctions of dielectrophoresis in biosensors and biochips for bacteria detection / L.A. Yang // Anal. Lett. – 2012. – № 45. – P. 187–201. – DOI: 10.1080/00032719.2011.633182.

11. Tomkins M.R. Coupled cantilever-microelectrode biosensor for enhanced pathogen detection / M.R. Tomkins, J. Chow, Y. Lai et al. // Sens. Actuators B Chem. – 2013. – № 176. – P. 248–252. – DOI: 10.1016/j.snb.2012.09.020.

12. Švorc Ľ. Electrochemical sensor for environmental monitoring of pesticides: Determination of atrazine in river waters using a boron-doped diamond electrode / Ľ. Švorc, M. Rievaj, D. Bustin // Sens. Actuators B Chem. – 2013. – № 181. – P. 294–300. – DOI: 10.1016/j.snb.2013.02.036.

13. Lafleur J.P. Gold nanoparticle-based optical microfluidic sensors for analysis of environmental pollutants / J.P. Lafleur, S. Senkbeil, T.G. Jensen et al. // Lab Chip. – 2012. – № 12. – P. 4651–4656. – DOI: 10.1039/c2lc40543a

14. Cheng I.F. An integrated dielectrophoretic chip for continuous bioparticle filtering, focusing, sorting, trapping, and detecting / I.F. Cheng, H.C. Chang, D. Hou et al. // Biomicrofluidics. – 2007. – № 10-1(2). – P. 021503. – DOI: 10.1063/1.2723669

15. Adekanmbi E.O. Dielectrophoretic applications for disease diagnostics using lab-on-a-chip platform / E.O. Adekanmbi, S. Srivastava // Lab Chip. – 2016. – № 16. – P. 2148–2167. – DOI: 10.1039/C6LC00355A

16. Saranin V.A. Ustojchivost' ravnovesija, zarjadka, konvekcija i vzaimodejstvie zhidkih mass v jelektricheskih poljah [Equilibrium Stability, Charging, Convection, and Interaction of Liquid Masses in Electric Fields] / V.A. Saranin. – Izhevsk: NIC RHD, 2009. – 332 p. [in Russian]

17. Morgan H. Separation of submicron bioparticles by dielectrophoresis / H. Morgan, M.P. Hughes, N.G. Green // Biophys. J. – 1999. – № 77. – P. 516–525. – DOI: 10.1016/S0006-3495(99)76908-0

18. Rosenthal A. Dielectrophoretic traps for single-particle patterning / A. Rosenthal, J. Voldman // Biophys. J. – 2005. – № 88. – P. 2193–2205. – DOI: 10.1529/biophysj.104.049684

19. Stishkov Ju.K. Jelektrogidrodinamicheskie techenija v zhidkih dijelektrikah [Electrohydrodynamic Currents in Liquid Dielectrics] / Ju.K. Stishkov, A.A. Ostapenko. – L.: Publishing house LSU, 1989. – 172 p. [in Russian]

20. Bhattacharya S. Insulator-based dielectrophoretic single particle and single cancer cell trapping / S. Bhattacharya, T.C. Chao, A. Ros // Electrophoresis. – 2011. – № 32. – P. 2550–2558.

21. Pethig R. Review – Where Is Dielectrophoresis (DEP) Going? / R. Pethig // J. Electrochem. Soc. – 2016. – № 164. – P. B3049–B3055.

22. Jones T.B. Basic theory of dielectrophoresis and electrorotation / T.B. Jones // IEEE Eng. Med. Biol. Mag. – 2003. – № 22. – P. 33–42.

23. Benhal P. AC electric field induced dipole-based on-chip 3D cell rotation / P. Benhal, J.G. Chase, P. Gaynor et al. // Lab. A Chip. – 2014. – № 14. – P. 2717–2727.

24. Huang L. A cell electro-rotation micro-device using polarized cells as electrodes / L. Huang, W. He, W. Wang // Electrophoresis. – 2019. – № 40. – P. 784–791.

25. Pethig R. Limitations of the Clausius-Mossotti function used in dielectrophoresis and electrical impedance studies of biomacromolecules / R. Pethig // Electrophoresis. – 2019. – № 40. – P. 2575–2583.

26. Clausius R. Die mechanische Wärmetheorie, Zweiter Band. Abschnitt III: Behandlung dielectrische Medien, Friedrich Vieweg und Sohn [The Mechanical Theory of Heat, Second Volume. Section III: Treatment of Dielectric Media, Friedrich Vieweg und Sohn] / R. Clausius. – Braunschweig: Adamant Media Corporation, 1879. – P. 62–97. [in German]

27. Lorentz H.A. Ueber die Beziehung zwischen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes und der Körperdichte [On the Relationship Between the Propagation Speed of Light and the Density of the Body] / H.A. Lorentz // Annalen der Physik. – 1880. – № 245. – P. 641–665. [in German]

 © Авторы статьи / Authors of the article

28. Lorenz L. Ueber die Refractionsconstante [On the Refraction Constant] / L. Lorenz // Annalen der Physik [Annals of Physics]. – 1880. – № 247. – P. 70–103. [in German]

29. Jones T.B. Electromechnics of particles / T.B. Jones. – Cambridge : Cambridge University Press, 1996. – 285 p.

30. Melcher Dzh. Jelektrogidrodinamika [Electrohydrodynamics] / Melcher Dzh. // Magnitnaja gidrodinamika [Magnetic Hydrodynamics]. – 1974. – № 2. – P. 3–30. [in Russian]

31. Grigor'ev A.I. Lokal'noe uvelichenie naprjazhennosti odnorodnogo jelektrostaticheskogo polja vblizi vershiny sferoidal'noj kapli [Local Increase in Homogeneous Electrostatic Field Intensity Near the Top of a Spheroidal Drop] / A.I. Grigor'ev, S.I. Shhukin // Zhurnal tehnicheskoj fiziki [Journal of Technical Physics]. – 1999. – Vol. 69. – Iss. 8. – P. 49–54. [in Russian]

32. Masalov V.M. Nanostruktura chastic dioksida kremnija, poluchennyh mnogostupenchatym metodom Shtobera–Finka–Bona [Nanostructure of Silicon Dioxide Particles Produced by Multistep Stauber-Fink-Bon Method] / V.M. Masalov, N.S. Suhinina, G.A. Emel'chenko // Himija, fizika i tehnologija poverhnosti [Chemistry, Physics, and Surface Technology]. – 2011. – Vol. 2. – № 4. – P. 373–384. [in Russian]

33. Zaharova G.P. Processy strukturoobrazovanija pri klinovidnoj degidratacii prostyh i mnogokomponentnyh rastvorov [Structure Formation Processes in Wedge Dehydration of Simple and Multicomponent Solutions] / G.P. Zaharova, V.V. Shabalin // Rossijskaja otorinolaringologija [Russian Otorhinolaryngology]. – 2014. – № 6(73). – P. 31–37. [in Russian]

34. Shabalin V.V. Biofizicheskie mehanizmy formirovanija tverdofaznyh struktur biologicheskih zhidkostej cheloveka: [Biophysical Mechanisms of Solid-Phase Structures Formation in Human Biological Fluids] dis. ... for PhD in Biology: 03.01.02: defended 31.05.18: apt. 27.11.18 / Shabalin Vladimir Vladimirovich. – Saint-Petersburg, 2018. – 375 p. [in Russian]