

На правах рукописи

Рыжкова Анна Викторовна

**ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМИГРАЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МИКРОЧАСТИЦ В НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Челябинск – 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет”

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Бескачко Валерий Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Бучельников Василий Дмитриевич

кандидат физико-математических наук
Чайков Леонид Леонидович

Ведущая организация: Институт физики молекул и кристаллов
Уфимский научный центр Российской Академии
Наук

Защита состоится 16 февраля 2011 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.298.04 в Южно-Уральском государственном университете по адресу 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан “ ____ ” января 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук



А.В. Роцин

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Методы управления движением частиц и молекул с помощью внешних электрических, магнитных и механических полей известны достаточно давно, однако всплеск интереса к этой области возник с бурным развитием микро- и нанотехнологий. Пространственное управление движением частиц нашло широкое применение в биотехнологиях и фармацевтике для исследования органических систем, селективного разделения многокомпонентных биологических и аналитических материалов, в нано- и микрожидкостных устройствах, дисплейных технологиях [1-3], а также в их приложениях для определения реологических свойств жидких сред, биологических клеток, ДНК [4].

Сегодня исследованиям движения микро- и наночастиц, диспергированных в жидких анизотропных средах, таких, как жидкие кристаллы (ЖК), растворы полимеров, ДНК, уделяется повышенное внимание. Данный интерес обусловлен возможностью управления параметрами ЖК с помощью внешнего электрического поля, а также особым характером взаимодействия между коллоидными частицами, следствием которых является формирование стабильных организованных коллоидных структур. Разработки методов управления движением микро- и нанокolloидов найдут широкое применение при создании фотонных кристаллов на основе упорядоченных трехмерных и двумерных коллоидных структур в жидкокристаллическом материале [5], в дисплейных технологиях, в качестве электронной бумаги [6] и в микрожидкостных приложениях. Перспективным направлением также является исследование управления движением жидкокристаллических коллоидов, на базе которых создаются перестраиваемые оптические микрорезонаторы [7]. На основе данных элементарных устройств возможно формирование сложных фотонных цепей (photonic circuits) [8].

На настоящий момент опубликовано всего несколько работ, посвященных исследованию движения микро- и наночастиц в жидких кристаллах (ЖК) под действием внешнего электрического поля. Это связано с тем, что динамика движения частиц в жидком кристалле значительно сложнее по сравнению с движением частиц в изотропных средах. В ЖК помимо известных электрокинетических явлений (электрофорез, диэлектрофорез и электроосмос) могут возникать дополнительные эффекты, связанные с анизотропией структуры, например, обратный поток, электрогидродинамические неустойчивости. Наиболее интересные и важные для практического применения электрокинетические явления должны возникать в

сильных электрических полях. В настоящее время они малоизучены, а общая теория, описывающая их, не предложена. Кроме этого нет сложившегося представления о природе сил, управляющих движением коллоидных частиц в жидких кристаллах.

Для исследования механизмов электромиграции частиц в ЖК необходимо применять комплексный подход, включающий в себя экспериментальные исследования с помощью метода анализа скорости движения, метода оптического захвата движущихся коллоидных частиц, диэлектрических и электрооптических измерений, а также метода компьютерного моделирования.

Цель настоящей работы - экспериментальное исследование динамики электромиграции диэлектрических микрочастиц в нематическом жидком кристалле под действием внешнего знакопеременного электрического поля.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать нематическую жидкокристаллическую ячейку со структурированными электродами, а также создать коллоидный раствор НЖК/микрочастицы и исследовать его электрооптические и диэлектрические свойства;
- 2) исследовать зависимость динамики движения диэлектрических микрочастиц от величины амплитуды, частоты и формы сигнала приложенного электрического поля, от ориентации директора НЖК, а также от геометрического положения микрочастиц;
- 3) экспериментально измерить силы, действующие на микрочастицу, и исследовать возможность количественного определения реологических параметров НЖК.

Используемые методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовался комплексный подход, сочетающий известные экспериментальные методы и методы компьютерного моделирования:

- для изготовления подложек со структурированными электродами использовался фотолитографический метод. На стекло, покрытое проводящим слоем индиево-оловянного оксида (*англ.* ITO), наносился фоторезист. Структура электродов задавалась специально изготовленной маской. Параметры электродов контролировались с помощью атомно-силового и оптического микроскопов;
- для изготовления жидкокристаллической ячейки (ЖК) использовалась традиционная технология. Нанесение полимерных ориентирующих слоев осуществлялось методом центрифугирования, толщина ЖК слоя задавалась с помощью спейсеров. Контроль толщины ячейки осуществлялся спектроскопическим методом;
- для изучения свойств нематического жидкого кристалла (НЖК), а также его смеси с диэлектрическими микрочастицами использовался метод диэлектрической спектроскопии и электрооптический метод;

- для исследования особенностей динамики электрокинетического движения микрочастиц использовался метод анализа скорости движения частиц;
- для количественной оценки значения сил, действующих на частицы, использовался метод оптического захвата. Данный метод позволил с высокой точностью определить величины электрокинетических сил, текучей вязкости НЖК, а также эффективный поверхностный заряд микрочастицы;
- для расчета пространственного распределения электрического поля и поля директора НЖК использовался метод конечных разностей. Используемый метод является оптимальным для расчета распределения полей в комплексной среде с несколькими границами раздела.

Научная новизна:

1. Впервые обнаружено и подробно изучено нелинейное электрофоретическое движение диэлектрических микрочастиц под действием внешнего знакопеременного электрического поля в нематическом жидком кристалле.

2. Впервые детально исследованы, а также объяснены особенности движения диэлектрических микрочастиц в НЖК материале под действием знакопеременного электрического поля. Впервые установлено, что максимальная скорость движения частиц достигается при планарной ориентации ячейки.

3. Впервые показана доминирующая роль электрофоретического эффекта в динамике движения микрочастиц под действием внешнего переменного электрического поля. Впервые подробно исследованы особенности движения частиц между электродами НЖК ячейки. Предложены механизмы, ответственные за неравномерное движение микрочастиц в области около электродов.

4. С помощью метода оптического захвата впервые измерены значения электрокинетических сил, приводящих микрочастицу в движение.

Практическая ценность работы:

1. Эффект нелинейного электрофореза может быть использован для управления движением, разделения микро- и нанообъектов в зависимости от их размеров и диэлектрических свойств. Системы, работающие на основе явления электрофореза, могут найти применение в медицине и фармацевтике для исследования органических систем, селективного разделения многокомпонентных биологических и аналитических растворов, в нано- и микрожидкостных устройствах [2-3], а также в дисплейных технологиях (электронная бумага) [6]. В отличие от случая линейного электрофореза, скорость движения микрочастиц при нелинейном электрофорезе выше в 10^3 раз.

2. Результаты, полученные при исследовании влияния характеристик электрического поля, а также ориентации ЖК на динамику движения частиц в микроканале, необходимы для определения наиболее оптимального режима для управления движением микро- и наночастиц.

3. Разработанный метод по определению локальной текучей вязкости НЖК, эффективного поверхностного заряда и электрофоретической подвижности микрочастиц, представляет сравнительно простой и недорогой способ определения микрореологических параметров среды.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Под действием сильного переменного электрического поля диэлектрические микрочастицы, диспергированные в нематическом жидком кристалле, перемещаются вдоль направления электрического поля. Среднюю скорость движения микрочастицы v за полупериод колебания можно разложить в ряд по нечетным степеням напряженности электрического поля E , $v = \mu^{(1)}E + \mu^{(3)}E^3$, где $\mu^{(1)}$ и $\mu^{(3)}$ – линейная и нелинейная электрофоретические подвижности, которые не зависят от E . Характер движения частицы определяется толщиной двойного электрического слоя (ДЭС). В данном случае для диэлектрической сферической микрочастицы диаметром $d = 2$ мкм он составляет $a \approx 190$ нм. В соответствии с теорией [9] для тонкого двойного электрического слоя ($d \gg a$) реализуется режим нелинейного электрофореза ($v = \mu^{(3)}E^3$).

2. При приложении к НЖК ячейке (толщиной 20 мкм) электрического поля (с амплитудой от $0,1 \times 10^6$ В/м до $1,6 \times 10^6$ В/м, частотой 0,5 Гц) с различной формой (прямоугольной, синусоидальной и треугольной) сигнала, скорость движения частиц зависит как от формы управляющего сигнала, так и от его амплитуды. Максимальная скорость движения частицы достигается при приложении напряжения с прямоугольной формой, минимальная – при треугольной $v_{\text{rec}} > v_{\text{sin}} > v_{\text{tri}}$, где v_{rec} , v_{sin} и v_{tri} – скорость движения микрочастицы при прямоугольном, синусоидальном и треугольном сигналах.

Нелинейная электрофоретическая подвижность микрочастиц $\mu^{(3)} = \langle v \rangle / \langle E^3 \rangle$, вычисленная как функция среднего за полупериод колебания приложенного электрического поля, не зависит от его формы и равна $\mu^{(3)} \approx 5 \times 10^{-22} \text{ м}^4 / (\text{В}^3 \times \text{с})$.

Скорость движения частиц зависит от ориентации НЖК. Максимальное значение скорости движения достигается при планарной ориентации НЖК, когда директор

ориентирован параллельно электрическому полю $v^{pl, \varphi=0^\circ}$, минимальная – при гомеотропной ориентации НЖК v^{hom} , когда директор перпендикулярен стеклянным подложкам. $v^{pl, \varphi=0^\circ} > v^{pl, \varphi=45^\circ} > v^{pl, \varphi=90^\circ} > v^{hom}$, где $v^{pl, \varphi=45^\circ}$ – планарная ориентация, когда угол между директором и электрическим полем равен 45° , $v^{pl, \varphi=90^\circ}$ – планарная ориентация, когда директор перпендикулярен направлению электрического поля.

3. Доминирующей силой, приводящей частицу в движение, является электрофоретическая сила F_{EPH} . Кроме электрофоретической силы на динамику движения объекта на расстоянии порядка 20 мкм от электродов оказывают влияние диэлектрофоретическая сила F_{DEP} и сила упругого захвата F_{ETF} .

Скорость движения частиц зависит от их пространственного положения в зазоре между электродами. В областях около электродов скорость частицы увеличивается, в то время как в середине зазора скорость движения постоянная. Около электродов скорость движения частицы определяется выражениями:

$$v^- = \frac{qE}{6\pi\eta r} + \frac{\varepsilon_{LC}\varepsilon_0 \operatorname{Re}[K_{CM}]r^2 \nabla E^2}{3\eta} + \frac{Kr^2}{6\pi\eta\xi^3}, \quad (1)$$

$$v^+ = \frac{qE}{6\pi\eta r} - \frac{\varepsilon_{LC}\varepsilon_0 \operatorname{Re}[K_{CM}]r^2 \nabla E^2}{3\eta} - \frac{Kr^2}{6\pi\eta\xi^3}, \quad (2)$$

где q – заряд частицы, K_{CM} – фактор Клаузиуса-Моссотти. Действительная часть фактора Клаузиуса-Моссотти зависит от частоты электрического поля. Если частота меньше критической частоты, равной частоте Максвелл-вагнеровской релаксации

$f = \frac{\sigma_p + 2\sigma_{LC}}{2\pi\varepsilon_0(\varepsilon_p + 2\varepsilon_{LC})}$, то $\operatorname{Re}[K_{CM}] = \frac{\sigma_p - \sigma_{LC}}{\sigma_p + 2\sigma_{LC}}$. В противном случае действительная часть

фактора Клаузиуса-Моссотти имеет вид: $\operatorname{Re}[K_{CM}] = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_{LC}}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_{LC}}$, где σ_p – поверхностная

проводимость микрочастицы, σ_{LC} – электропроводность жидкого кристалла; $\varepsilon_p, \varepsilon_{LC}$ – диэлектрическая проницаемость микрочастицы и жидкого кристалла, соответственно; r – радиус микрочастицы; η – текучая вязкость НЖК; K – постоянная Франка; ξ – размер области неоднородной ориентации НЖК около электродов. Выражение (1) соответствует значению скорости микрочастицы, когда она находится около отрицательно заряженного электрода в области действия диэлектрофоретической силы и силы упругого захвата. Выражение (2) соответствует значению скорости движения частицы, которая находится у положительно заряженного электрода.

Область действия силы упругого захвата F_{ETF} для исследуемых условий составляет порядка 20 мкм от электродов. Величина и область действия диэлектрофоретической силы F_{DEP} зависит от диэлектрических параметров среды и частицы, ее радиуса, а также от пространственной неоднородности электрического поля. В условиях проводимого эксперимента (для частиц $r=2$ мкм) область действия F_{DEP} равна ≈ 40 мкм от каждого электрода. За пределами данной области на частицу действует только электрофоретическая сила и сила Стокса.

С помощью метода оптического захвата определены значения электрофоретической и диэлектрофоретической сил, действующие на диэлектрическую микрочастицу ($r=2$ мкм). Исследования проводились для ячейки толщиной 20 мкм, мощность лазерного излучения составляла $P=31$ мВт, длина волны излучения $\lambda=488$ нм, $T=40$ °С. Значения диэлектрофоретической силы, действующей на микрочастицу на расстоянии 40 мкм, 30 мкм, 20 мкм, 10 мкм, от электродов составляет 0,27 пН, 0,73 пН, 1,32 пН, 2,16 пН, соответственно. Значение электрофоретической силы равно $F_{EPH}=5,1$ пН. Определены эффективный заряд микрочастицы $q \approx 2,1 \times 10^{-17}$ Кл и эффективная текучая вязкость НЖК в направлении перпендикулярном директору $\eta_{eff}=(21,2 \pm 4,7) \times 10^{-3}$ Па·с.

Личный вклад. Автором разработана экспериментальная техника и методики проведения экспериментов по изучению электрокинетических явлений и оптического захвата микрочастиц в жидких кристаллах. Исследована динамика движения коллоидов (меламин-формальдегид резин), а также оценены параметры жидкости (текучая вязкость) и частицы (линейная и нелинейная электрофоретические подвижности, эффективный поверхностный заряд). Проведен анализ полученных результатов, предложена модель нелинейного электрофореза. Автором проведено компьютерное моделирование расчета сил, действующих на микрочастицу при оптическом захвате.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: на международных конференциях 3rd International Workshop on Liquid Crystal for Photonics, 8-10 September 2010, Elche, Spain, 23rd International Liquid Crystal Conference 11-16 July 2010, Krakow, Poland, 37 Arbeitstagung Flüssigkristalle ("Topical Meeting on Liquid Crystals") 1-3 April 2009, Stuttgart; Germany, 12th International Conference on Ferroelectric Liquid Crystals; 31 August - 4 September, 2009, Zaragoza; Spain, NATO Advanced Study Institute "Unexploded Ordnance Detection and Mitigation" 20 July – 2 August, 2008, Il Ciocco,

Italy; на 62ой научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Южно-Уральского государственного университета, 16 апреля 2010 г.; на III Всероссийской молодежной школе-семинар с международным участием «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» Москва, 25 - 30 октября 2009 г.; на конференциях молодых ученых Института Электрофизики (Екатеринбург, 2006, 2009 г.); на конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых по «Оптике и лазерной физике», Самара, 2004 и 2006 г.

Доклад по диссертационной работе был представлен на семинарах в группах Prof. Dr. W. Haase, Eduard Zintl Institute for Inorganic and Physical Chemistry, Darmstadt University of Technology, Prof. Dr. B. Stuehn, Institute of Condensed Matter Physics, Darmstadt University of Technology, Prof. Dr. T. Halfmann, Institute of Applied Optics, Darmstadt University of Technology, Prof. Dr. C. Tropea, Center of Smart Interfaces, Darmstadt University of Technology.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 научных работ, 3 из которых – в рецензируемых журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения, листа благодарности, списка литературы, содержащего 125 наименований цитируемой литературы и списка публикаций. Общий объем диссертации, включая рисунки и таблицы, составляет 153 машинописных страниц.

Основное содержание работы

Работа состоит из четырех основных частей, каждая глава начинается с короткого введения и оканчивается заключением.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи, указана научная новизна работы.

В первой главе приведена классификация жидких кристаллов, описано их химическое строение, а также физические (диэлектрические, электрооптические, реологические, упругие) свойства. Приведены результаты обзора методов управления движением микрочастиц в жидких средах. Рассмотрены способы манипуляции частицами с помощью внешнего электрического поля. Подробно описаны явления, а также механизмы возникновения электрофореза, диэлектрофореза, нелинейных электрокинетических эффектов. Описаны способы управления частицами с помощью

оптических ловушек. Рассмотрены некоторые классы пучков, обладающие уникальными свойствами по сравнению с гауссовым пучком. Представлены способы измерения вязкоупругих свойств материалов с помощью оптического захвата.

Анализ литературы показал, что исследования электрокинетических явлений в ЖК одновременно с помощью двух методов: анализа скорости движения частиц и оптического захвата не проводились.

Во второй главе описаны экспериментальные методики, используемые для исследования динамики движения микрочастиц под действием внешнего переменного электрического поля, оптического захвата микрочастицы.

Представлены результаты измерения диэлектрических и электрооптических свойств НЖК (MLC-6003, $T_{N-iso} = 84 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\varepsilon = 7,7$; $\varepsilon_{||} = 11,7$; $\varepsilon_{\perp} = 4$ ($f=1 \text{ kHz}$, $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$), время отклика $\tau = 20 \text{ мс}$; текучая вязкость $\eta_{||} = 0,054 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\eta_{\perp} = 0,08 \text{ Па}\cdot\text{с}$ $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma_{LC} \approx 1,5 \times 10^{-11} \text{ См/см}$ ($f=0,5 \text{ Гц}$), $\rho_{LC} = 1100 \text{ кг/м}^3$), а также коллоидного раствора НЖК/микрочастицы. Сферические диэлектрические микрочастицы изготовлены из меламин-формальдегид резина. На поверхности частицы меламина находится метилоловая группа. Вследствие высокой плотности полярных триазиамино и имино групп, микрочастицы обладают гидрофильной положительно заряженной поверхностью. Описаны физические свойства частиц.

Предложена конфигурация жидкокристаллической ячейки, позволяющая наблюдать за динамикой движения микрочастиц, а также осуществлять их оптический захват (рис. 1а). Ячейка сделана из двух стеклянных подложек, расстояние между которыми заполнено смесью нематического жидкого кристалла с диэлектрическими микрочастицами. На нижней подложке располагаются планарные электроды. Подробно описана технология создания нематической жидкокристаллической ячейки.

Представлено описание экспериментальной установки для исследования движения микрочастиц (рис. 1б). Установка состояла из поляризационного микроскопа, видеокамеры, ячейки, генератора импульсов, усилителя сигналов и осциллографа. Такая схема позволяла исследовать динамику движения частиц и оценивать скорость перемещения микрообъекта в зависимости от формы, частоты и амплитуды приложенного сигнала.

Описана методика измерения вязкоупругого отклика материала и электрических параметров микрочастицы. Представлено описание экспериментальной установки, состоящей из Ar лазера, собирающей линзы, зеркал,

микроскопа, видеокамеры, ячейки (закрепленной на микро- и наноподвижках), подключенной к усилителю сигналов, генератору импульсов, осциллографу.

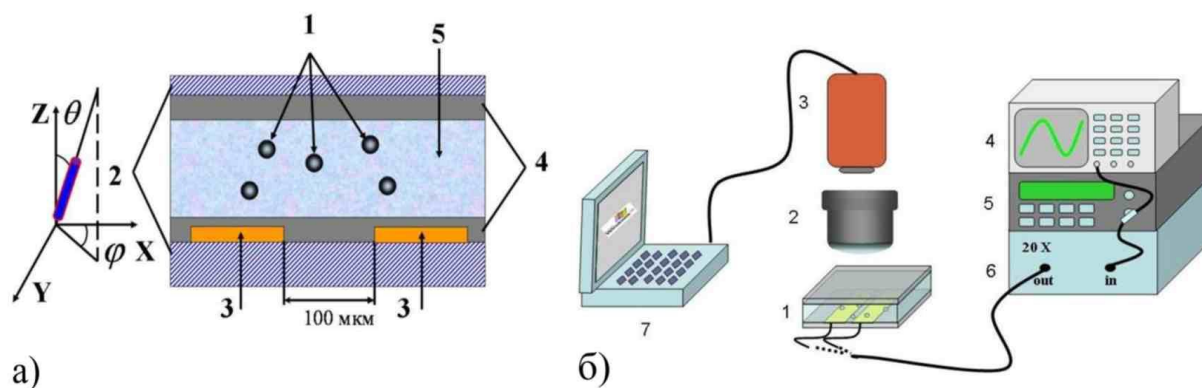


Рисунок 1. (а) Структура жидкокристаллической ячейки для исследования динамики движения микрочастиц в переменном электрическом поле; 1 – микрочастицы; 2 – стеклянные подложки; 3 – электроды; 4 – ориентирующий полимерный слой; 5 – НЖК. (б) Схема установки для исследования электрокинетических явлений в НЖК: 1 – НЖК ячейка; 2 – микроскоп; 3 – ПЗС камера; 4 – осциллограф; 5 – генератор; 6 – усилитель напряжения; 7 – компьютер.

Для оценки параметров микрочастицы и НЖК, частица захватывалась в лазерную ловушку и подвергалась действию со стороны электрического поля. Из баланса силы оптического захвата и электрокинетических сил, действующих на микрочастицу, определялись искомые величины.

В заключительной части главы представлены методы определения погрешностей измерений.

В третьей главе описано экспериментальное исследование динамики движения микрочастицы ($r=2$ мкм) между электродами. Показано, что направление движения объекта зависит от полярности электрического поля (рис. 2а) и носит пороговый характер (около 0,1-0,2 В/мкм).

В качестве основного движущего механизма предложен электрофорез. Оценена скорость движения частицы между электродами в планарно ориентированной НЖК ячейке ($f= 0,1$ Гц, $E= 0,6$ В/мкм, форма сигнала прямоугольная).

Показано, что в середине зазора между электродами частица движется равномерно и прямолинейно, в то время как возле электрода скорость движения частицы возрастает (рис. 2б). Предложена гипотеза, что изменение скорости движения объекта связано с действием дополнительных механизмов, а именно диэлектрофоретического и силы упругого захвата. Для подтверждения гипотезы проведено компьютерное моделирование пространственного распределения

электрического поля и поля директора в НЖК. Для моделирования применялся метод конечных разностей.

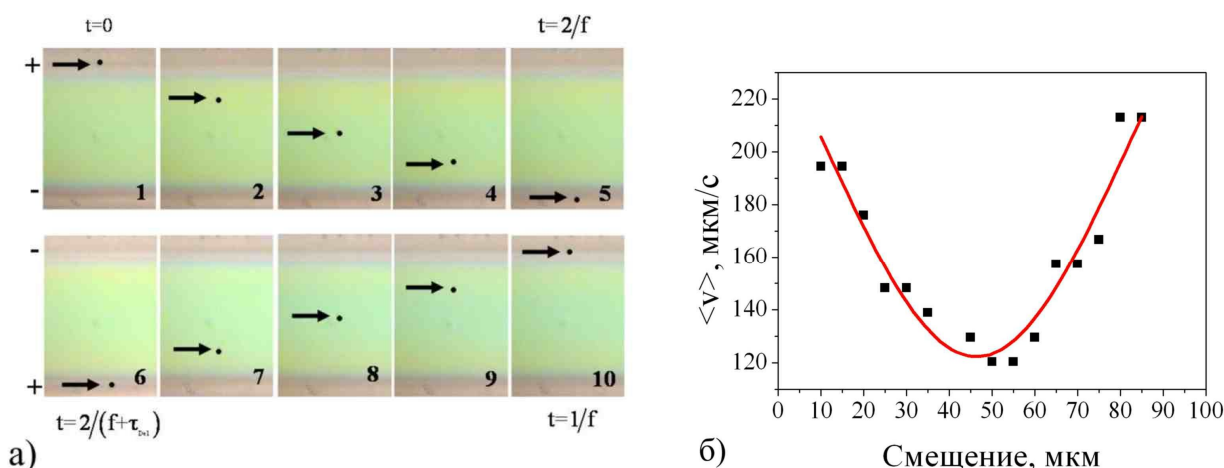


Рисунок 2. (а) Динамика движения микрочастицы между электродами. $T = 25$ °С. (б) Зависимость средней скорости движения микрочастицы от ее положения относительно электродов. Планарная ориентация $\varphi=90^\circ$, форма сигнала прямоугольная, $f = 0,1$ Гц, амплитуда напряжения 60 В, $T = 40$ °С, $r = 2$ мкм.

Анализ результатов моделирования показал, что в области около электрода электрическое поле и поле директора пространственно неоднородны. Такие искажения полей вызывают возникновение дополнительных сил: диэлектрофоретической силы (F_{DEP}) и силы упругого захвата (F_{ETF}), влияющих на динамику движения частицы. Силы, действующие на частицу вблизи электрода, а также распределение электрического поля и поля директора показаны на рис. 3.

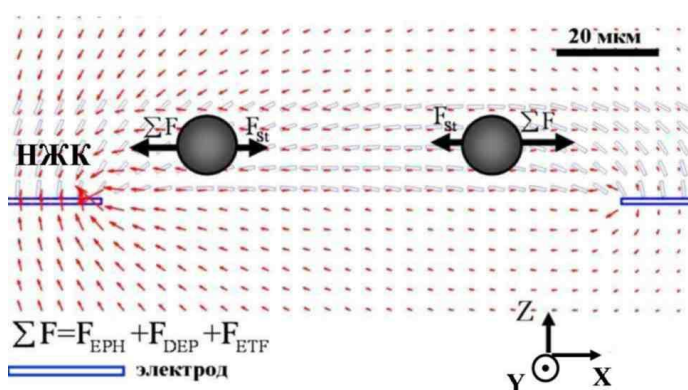


Рисунок 3. Схема сил, действующих на микрочастицу в зависимости от положения между электродами, а также распределение электрического поля и поля директора. На рисунке отмечены F_{EPH} электрофоретическая, F_{DEP} диэлектрофоретическая силы, F_{ETF} сила упругого захвата и F_{St} сила Стокса.

Показано, что скорость движения микрообъекта в результате действий электрофоретической силы (F_{EPH}), диэлектрофоретической силы (F_{DEP}), силы Стокса (F_{St}) и силы упругого захвата (F_{ETF}) при приближении к электроду увеличивается (рис.

3), в то время как при удалении – уменьшается. Приведены оценки значений электрофоретической, диэлектрофоретической сил и силы упругого захвата.

Экспериментально показана возможность оценки значений электрокинетических сил, действующих на микрочастицу, с помощью оптического пинцета. Исследована динамика частицы в зависимости от ее положения между электродами под действием переменного электрического поля (рис. 4) и рассчитаны значения F_{EPH} и F_{DEP} .

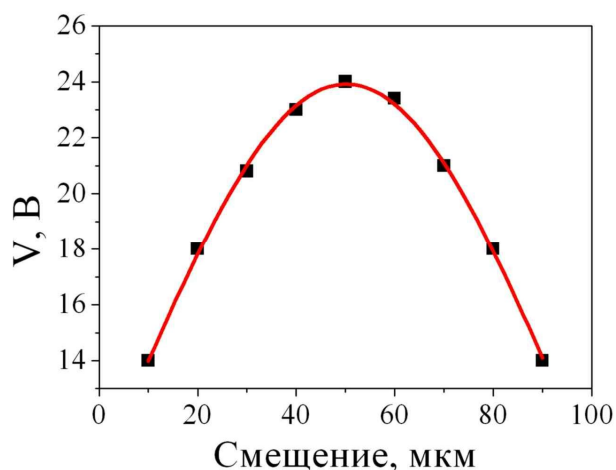


Рисунок 4. Зависимость амплитуды приложенного напряжения V электрического поля, при которой микрочастица покидает оптическую ловушку, от положения частицы в зазоре между электродами. $P=31$ мВт, $f=1$ Гц, форма сигнала прямоугольная, $T=40$ °С, $r=2$ мкм.

Продемонстрировано, что при данных экспериментальных условиях (частота 0,5–30 Гц, амплитуда напряжения 10–40 В) частица движется под действием линейного электрофореза.

Показано, что возле электродов частица подвержена влиянию дополнительных механизмов, так как требуется более слабое электрическое поле для перемещения объекта из оптической ловушки, что подтверждает результаты, полученные с помощью метода анализа скоростей (рис. 2б).

Представлены результаты оценки электрокинетических сил, действующих на микрочастицу. Силы оценены из уравнения баланса сил, действующих на частицу в оптической ловушке $\vec{F}_{LT} + \vec{F}_{EPH} + \vec{F}_{DEP} + \vec{F}_{ETF} + \vec{F}_{St} = 0$, где \vec{F}_{LT} – сила захвата оптической ловушки (так как число Рейнольдса значительно меньше 1).

В середине зазора между электродами влияние диэлектрофоретической силы и силы упругого захвата на частицу отсутствует из-за нулевых градиентов, как электрического поля, так и поля директора. Захваченный в оптическую ловушку объект находится в покое, следовательно $\vec{F}_{St} = 0$, тогда из уравнения баланса сил $\vec{F}_{LT} + \vec{F}_{EPH} = 0$ следует $q = F_{LT}/E$, где q – эффективный поверхностный заряд. Значения эффективного заряда и скорости движения частицы в электрическом поле (при

отсутствии оптической ловушки) позволяют оценить текучую вязкость НЖК: $\vec{F}_{St} + \vec{F}_{EPH} = 0$, $\eta = qE / (6\pi\eta v)$, $\eta_{eff} \approx (21,2 \pm 4,7) \times 10^{-3}$ Па·с, также значение эффективного поверхностного заряда микрочастицы $q = 2,1 \times 10^{-17}$ Кл. Полученные данные текучей вязкости НЖК хорошо согласуются в пределах погрешности с данными, предоставленными производителем.

Используя выражение (3), приведена оценка значения линейной электрофоретической подвижности $\mu^{(1)}$ для случая слабого электрического поля:

$$\mu^{(1)} = \frac{q}{6\pi\eta r}. \quad (3)$$

Для $q \approx 2,1 \times 10^{-17}$ Кл, $\eta_{\parallel} = 0,054$ Па·с и $\eta_{\perp} = 0,08$ Па·с ($T = 20$ °С), $r = 2$ мкм линейная электрофоретическая подвижность вдоль направления директора ЖК и перпендикулярно равна $\mu_{\parallel}^{(1)} \approx 10^{-11}$ м²/(В×с) и $\mu_{\perp}^{(1)} \approx 7 \times 10^{-12}$ м²/(В×с), соответственно.

Представлены результаты оценки значения F_{DEP} , действующей на частицу на расстояниях от 10 мкм до 40 мкм от электродов. Значение силы определялось с помощью выражения:

$$\vec{F}_{LT} + \vec{F}_{EPH} + \vec{F}_{DEP} = 0. \quad (4)$$

Значения F_{DEP} на расстоянии 40 мкм, 30 мкм, 20 мкм, 10 мкм, от электродов составляет 0,27 пН, 0,73 пН, 1,32 пН, 2,16 пН, соответственно.

Показано, что измерение F_{ETF} при данных условиях эксперимента практически неосуществимо вследствие нагрева и разупорядочения молекул НЖК вокруг поверхности микрообъекта из-за сильно сфокусированного лазерного пучка. Толщина разориентированного слоя НЖК составляет порядка нескольких микрометров, что сопоставимо с областью действия силы упругого захвата.

В заключительной части главы показано, что при малых размерах частиц ($r \approx 1$ мкм) влиянием на динамику движения микрочастицы диэлектрофоретической силы и силы упругого захвата можно пренебречь.

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты анализа скоростей движения микрочастицы под действием внешнего электрического поля. К исследуемым ячейкам прикладывалось биполярное напряжение с прямоугольной, синусоидальной и треугольной формами сигнала, с частотой в диапазоне от 0,5 Гц до 10 Гц и амплитудой, изменяющейся в пределах от 10 В до 160 В, скважность сигнала была постоянной и равной 50%.

Обнаружена нелинейная (кубическая) зависимость скорости движения объекта от значения амплитуды напряжения. Данная кубическая зависимость объяснена в рамках теории нелинейного электрофореза [9,10] и показывает, что поверхностный эффективный электрический заряд (дзета-потенциал) микрочастицы зависит от квадрата напряженности приложенного поля $q \propto E^2$ (рис. 5).

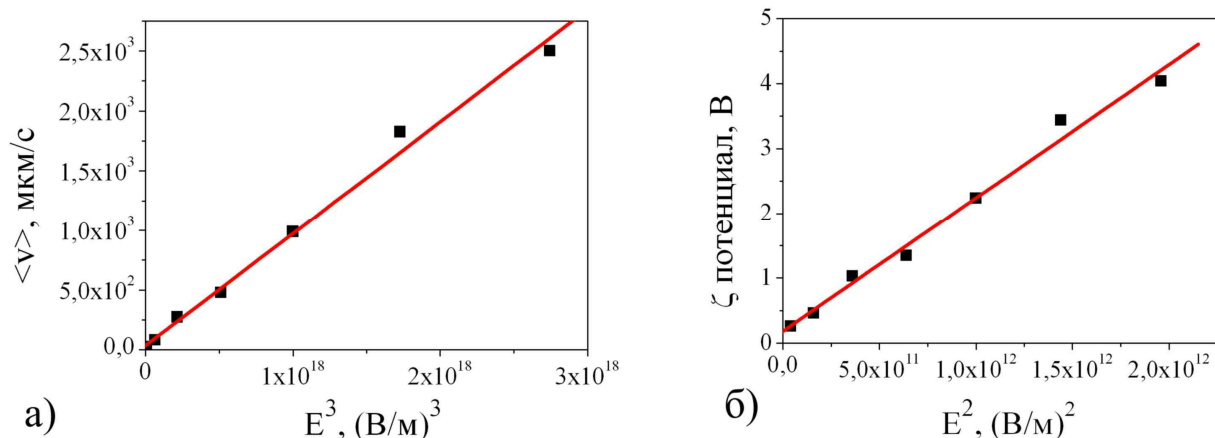


Рисунок 5. (а) Зависимость средней скорости движения микрочастиц от E^3 ; (б) зависимость ζ -потенциала от E^2 . Форма сигнала прямоугольная, $f = 0,5$ Гц, $T = 25$ °С, $r = 1$ мкм.

В теории [9] показано, что данная функциональная зависимость возникает в результате действия двух сил. Первая сила появляется вследствие кулоновского взаимодействия внешнего электрического поля с индуцированным зарядом тонкого двойного электрического слоя, окружающего микрочастицу. Величина индуцированного заряда определяется выражением:

$$q_1 = 6\epsilon_m \epsilon_0 \pi E^2 r^3 \frac{e}{k_B T} \frac{n^-(n^+)^2 Du^2}{(n^+ + n^-)^2 (Du + (t^+)^2)^2}, \quad (5)$$

где $Du = \sigma_p / (\sigma_{LC} r)$ – число Духина, $t^+ = n^+ D^+ / (n^+ D^+ + n^- D^-)$, D^\pm , n^\pm – коэффициент диффузии и концентрация положительных и отрицательных ионов, соответственно, T – температура, k_B – постоянная Больцмана, ϵ_m – комплексная диэлектрическая проницаемость НЖК, e – заряд электрона, E – напряженность приложенного электрического поля.

Вторая сила связана с взаимодействием электрического поля и индуцированного заряда ионов, находящихся в объеме НЖК материала за пределами двойного слоя:

$$q_2 = 2\pi \epsilon_m \epsilon_0 E^2 r^3 \frac{e}{k_B T} \frac{n^+ n^- Du}{(n^+ + n^-) (Du + t^+)}. \quad (6)$$

Данная сила действует на жидкий кристалл на расстоянии сравнимом с радиусом микрочастицы. Воздействие осуществляется посредством гидродинамических и вязкоупругих сил, возникающих в окружающем микрочастицу жидкокристаллическом слое. Таким образом, скорость движения микрообъектов под действием внешнего электрического поля осуществляется благодаря двойному слою и зарядам, находящимся в объеме, и определяется выражением $\bar{v} = \bar{F}_{EPH} / (6\pi\eta r) = q\bar{E} / (6\pi\eta r) = q(\bar{E}^2)\bar{E} / (6\pi\eta r) = \mu^{(3)}\bar{E}^3$. В таком случае нелинейная электрофоретическая подвижность может быть записана как:

$$\mu^{(3)} = r^2 \frac{e}{k_B T \eta} \varepsilon_{LC} \varepsilon_0 \frac{Du^2}{(1+2Du)^2} \cdot \quad (7)$$

Используя экспериментальные данные, рассчитана нелинейная электрофоретическая подвижность $\mu^{(3)}$. В соответствии с формулой (7) для ячейки с планарной ориентацией НЖК ($\varepsilon_{LC} = 11,7$, $T=300$ К) $\mu^{(3)} \approx 2 \times 10^{-20} \text{ м}^4 / (\text{В}^3 \times \text{с})$.

Оценено значение нелинейной электрофоретической подвижности микрочастицы $\mu^{(3)} = \langle v \rangle / \langle E^3 \rangle$. Показано, что подвижность не зависит от формы сигнала за полупериод колебания электрического поля:

$$\langle v \rangle = \mu^{(3)} \langle E^3 \rangle = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \mu^{(3)} E^3 dt \cdot \quad (8)$$

где T – период колебания электрического поля. В случае биполярного прямоугольного сигнала импульса среднее значение скорости движения микрообъекта за полупериод колебания электрического поля имеет вид $\langle v^{REC} \rangle = \mu^{(3)} E^3$, биполярного треугольного сигнала импульса – $\langle v^{TR} \rangle = \mu^{(3)} E^3 / 4$ и для биполярного синусоидального – $\langle v^{SINE} \rangle = 4\mu^{(3)} E^3 / (3\pi)$. Зависимость средней скорости движения $\langle v \rangle$ от среднего значения куба напряженности $\langle E^3 \rangle$ за полупериод колебания электрического поля представлена на рис. 6. Анализ функциональных зависимостей показывает, что нелинейная электрофоретическая подвижность $\mu^{(3)}$ практически одинакова для всех форм сигнала приложенного напряжения и приблизительно равна $\mu^{(3)} \approx 5 \times 10^{-22} \text{ м}^4 / (\text{В}^3 \times \text{с})$.

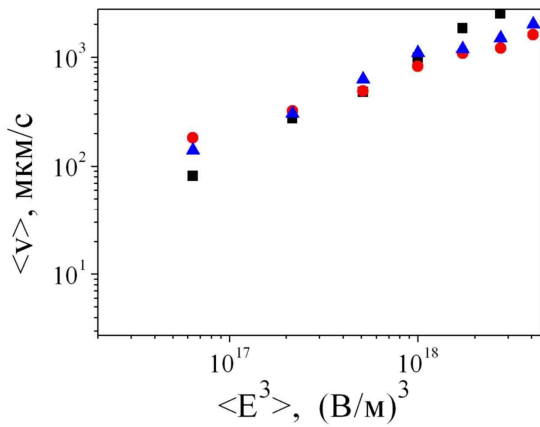


Рисунок 6. Зависимость средней скорости движения микрочастицы от среднего значения куба напряженности электрического поля для прямоугольной (■), синусоидальной (●) и треугольной (▲) форм сигнала, $f = 0,5$ Гц, планарная ориентация $\varphi = 0^\circ$, $T = 25$ °С, $r = 1$ мкм.

Экспериментально исследована зависимость скорости движения объекта от ориентации жидкокристаллической ячейки. Анализ полученной зависимости показал, что максимальная скорость объекта достигается в планарно ориентированном образце, когда директор НЖК ориентирован параллельно приложенному электрическому полю, минимальная – в гомеотропно ориентированной ячейке, когда директор направлен перпендикулярно стеклянным подложкам (рис. 7).

НЖК является анизотропным материалом, и его эффективная вязкость определяется угловой ориентацией директора, описанная уравнением $\eta(\theta, \varphi) = \eta_2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + \eta_3 \cos^2 \theta + \eta_1 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi$, где φ – угол между директором ЖК и приложенным электрическим полем E , θ – угол между директором и нормалью z к ячейке; $\eta_1 = \eta(\theta=90^\circ, \varphi=90^\circ)$ – коэффициент вязкости, соответствующий директору НЖК, ориентированному планарно перпендикулярно направлению действия поля, $\eta_2 = \eta(\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ)$ – коэффициент вязкости, соответствующий планарной ориентации НЖК, когда директор параллелен приложенному внешнему полю E , $\eta_3 = \eta(\theta=0^\circ)$ – коэффициент вязкости, соответствующий директору НЖК ориентированному гомеотропно, перпендикулярно к подложкам ячейки. Коэффициенты η_1 , η_2 и η_3 находятся в следующем соотношении $\eta_1 > \eta_3 > \eta_2$.

Показано, что скорость движения микрочастиц в НЖК определяется анизотропией текучей вязкости и диэлектрической проницаемости. Экспериментально полученные отношения скорости движения микрочастиц в планарно и гомеотропно ориентированных ячейках равно $\frac{v^{pl, \varphi=0^\circ}}{v^{hom}} \approx 1,9$, $\frac{v^{pl, \varphi=90^\circ}}{v^{hom}} \approx 1,2$,

$\frac{v^{pl, \varphi=0^\circ}}{v^{pl, \varphi=90^\circ}} \approx 1,5$. Расчетное соотношение скоростей движения частиц для планарных и

гомеотропно ориентированных образцов равно $\frac{v^{pl,\varphi=0^\circ}}{v^{hom}} = \frac{\varepsilon_{\parallel}\eta_3}{\varepsilon_{\perp}\eta_2} \approx 3$, $\frac{v^{pl,\varphi=90^\circ}}{v^{hom}} = \frac{\varepsilon_{\perp}\eta_3}{\varepsilon_{\perp}\eta_1} \approx 0,8$,

$$\frac{v^{pl,\varphi=0^\circ}}{v^{pl,\varphi=90^\circ}} = \frac{\varepsilon_{\parallel}\eta_1}{\varepsilon_{\perp}\eta_2} \approx 4.$$

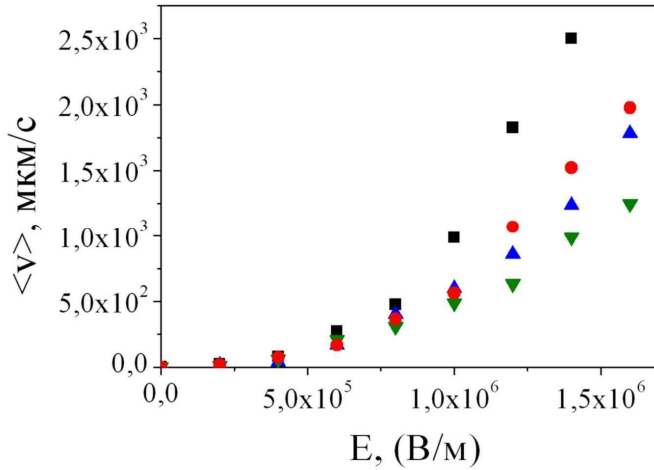


Рисунок 7. Зависимость средней скорости движения микрочастиц от напряженности электрического поля, когда директор ориентирован планарно $\varphi = 0^\circ$ (■), $\varphi = 45^\circ$ (●), $\varphi = 90^\circ$ (▲) и гомеотропно $\theta = 0^\circ$ (▼), форма сигнала прямоугольная, $f = 0,5$ Гц, $T = 25$ °С, $r = 1$ мкм.

Проиллюстрировано, что во всех ориентированных образцах НЖК наблюдается явление нелинейного электрофореза.

Температура может значительно изменить двойной электрический слой и, как следствие, динамику движения микрочастицы. Из рис. 8 видно, что $\mu^{(3)}$ значительно возрастает с температурой до температуры точки просветления (84 °С), достигая значений $\approx 1 \times 10^{-20}$, $0,6 \times 10^{-20}$ $\text{м}^4/(\text{В}^3 \times \text{с})$ для планарной $\varphi = 0^\circ$ и гомеотропной ориентаций НЖК ячейки соответственно.

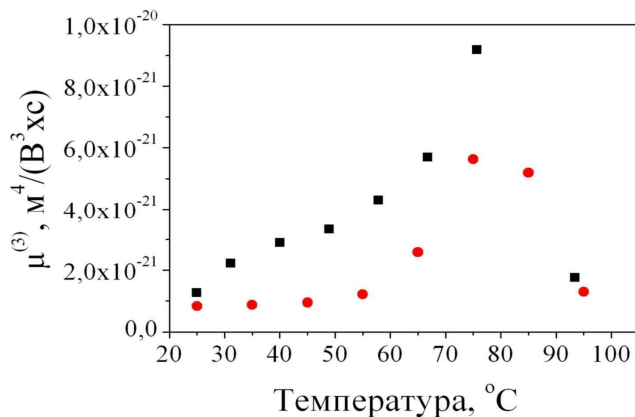


Рисунок 8. Зависимость нелинейной электрофоретической подвижности от температуры для планарной $\varphi = 0^\circ$ (■) и гомеотропной (●) ориентаций.

При температуре, превышающей точку просветления, значение нелинейной электрофоретической подвижности $\mu^{(3)}$ падает до 10^{-21} $\text{м}^4/(\text{В}^3 \times \text{с})$. Данное поведение объяснено значительным уменьшением (результатирующего) суммарного заряда в двойном электрическом слое вследствие теплового движения ионов, а также теплового разложения материала меламина. Оценено время формирования двойного

электрического слоя (τ_{del}). В соответствии с формулой Шварца, τ_{del} составляет около 0,05 с, которое соответствует критическому значению частоты $f=1/\tau_{del}=20$ Гц. Экспериментально показано, что частота, при которой движение частиц затухает, составляет ≈ 10 Гц. Полученные экспериментальные и теоретические оценки находятся в хорошем согласии.

Основные результаты и выводы.

- I. С помощью метода диэлектрической спектроскопии и электрооптических измерений определены физические свойства нематического жидкого кристалла MLC6003, а также свойства коллоидного раствора НЖК/микрочастицы. Анализ результатов измерений показал, что диэлектрические и электрооптические свойства коллоидного раствора и чистого материала НЖК идентичны, полученные отличия не превышают значения экспериментальной ошибки.
- II. Исследована динамика движения диэлектрических микрочастиц под действием сильного ($0,1 < E < 1,6$ В/мкм) знакопеременного электрического поля в нематическом жидком кристалле. Обнаружена нелинейная зависимость средней скорости движения микрочастиц $v=\mu^{(3)}E^3$ от напряженности приложенного электрического поля. Данная зависимость объяснена в рамках модели нелинейного электрофореза. Экспериментально оценено значение нелинейной электрофоретической подвижности $\mu^{(3)} \approx 5 \times 10^{-22} \text{ м}^4 / (\text{В}^3 \times \text{с})$ (в ячейке с планарной ориентацией $\varphi = 0^\circ$).
- III. Исследована динамика движения микрочастицы в ячейке с планарной ориентацией, когда угол между директором ЖК и приложенным электрическим полем составляет $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, и гомеотропной ориентацией, где директор НЖК направлен перпендикулярно стеклянным подложкам. Показано, что максимальная скорость достигается при движении микрообъекта в планарно ориентированной ячейке ($\varphi = 0^\circ$), минимальная – в гомеотропно ориентированной ($v^{\varphi=0^\circ} > v^{\varphi=45^\circ} > v^{\varphi=90^\circ} > v^{\text{hom}}$). Данная зависимость объяснена влиянием анизотропией текучей вязкости и диэлектрической проницаемости НЖК ($\frac{v^1}{v^2} = \frac{\varepsilon_1 \eta_2}{\varepsilon_2 \eta_1}$).
- IV. Проведено компьютерное моделирование распределения электрического поля и поля директора НЖК в ячейке с планарными электродами. Показано, что вследствие неоднородного распределения электрического поля, возникают

дополнительные электрокинетические механизмы, ответственные за движение диэлектрических микрочастиц: диэлектрофорез и сила упругого захвата.

V. С помощью метода оптического захвата определено значение линейной электрофоретической подвижности диэлектрических микрочастиц вдоль и перпендикулярно направлению директора НЖК $\mu_{\parallel}^{(1)} \approx 10^{-11} \text{ м}^2/(\text{В} \times \text{с})$ и $\mu_{\perp}^{(1)} \approx 7 \times 10^{-12} \text{ м}^2/(\text{В} \times \text{с})$, соответственно. Оценено значение эффективного поверхностного заряда микрочастицы $q \approx 2,1 \times 10^{-17} \text{ Кл}$ и эффективной текучей вязкости НЖК в направлении движения микрочастицы $\eta \approx (21,2 \pm 4,7) \times 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ($T=40 \text{ }^\circ\text{C}$). Оценены значения электрофоретической и диэлектрофоретической сил. $F_{\text{EPH}} = 5,1 \text{ пН}$, $F_{\text{DEP}} \approx 0,27 \text{ пН}$, $0,73 \text{ пН}$, $1,32 \text{ пН}$, $2,16 \text{ пН}$ на расстоянии 40 мкм, 30 мкм, 20 мкм, 10 мкм от электродов, соответственно.

В приложении приведен расчет силы оптического захвата. Представленные выражения позволяют оценить силы, действующие на частицу, как вдоль оси распространения пучка, так и перпендикулярно ему. На основе представленных выражений автором написана программа, рассчитывающая силы в зависимости от условий эксперимента.

Список публикаций по теме диссертации:

- 1*. **Ryzhkova, A.V.** Nonlinear electrophoretic motion of dielectric microparticles in nematic liquid crystals / A.V. Ryzhkova, F.V. Podgornov, W. Haase // Appl. Phys. Lett. – 2010. – V.96, № 15. – P.151901.
- 2*. **Рыжкова, А.В.** Управление двумерным движением микрочастиц в нематическом жидком кристалле / А.В. Рыжкова, Ф.В. Подгорнов, W. Haase // Ж. Краткие сообщения по физике, ФИАН. – 2009. – Т. 36, № 12. – С. 47 – 49.
- 3*. Haase, W. Нелинейное движение диэлектрических микрочастиц в нематическом жидком кристалле под действием сильного электрического поля / W. Haase, Н.Д. Кундикова, Ф.В. Подгорнов, **А.В. Рыжкова** // Ж. Краткие сообщения по физике, ФИАН. – 2009. – Т. 36, № 12. – С. 43 – 46.
- 4*. **Рыжкова, А.В.** Электрокинетические явления в нематических жидких кристаллах / А.В. Рыжкова, Ф.В. Подгорнов, W. Haase // Наука ЮУрГУ: материалы 62-ой научной конференции. Секции естественных наук. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – 2010. – С. 140 – 144.

5*. **Ryzhkova, A.V.** On mechanism of the electromigration of dielectric microparticles in nematics liquid crystals / A.V. Ryzhkova, F.V. Podgornov, W. Haase // Proc. 37 Arbeitstagung Flüssigkristalle ("Topical Meeting on Liquid Crystals") 1-3 April 2009, Stuttgart, Germany, P39.

Список цитируемой литературы

- [1] Zhao, Y. Microparticle concentration and separation by traveling wave dielectrophoresis (twDEP) for digital microfluidics / Y. Zhao, U.-C. Yi, S.K. Cho // J. Microelectromech. Systems. – 2007. – V.16. – P. 1472–1481.
- [2] Huang, C. Design and fabrication of an automated microchip-based cell separation device / C. Huang, Yu J., J. Zhu, L. Wang, M. Guo // Anal. Lett. – 2007. – V.63. – P.763–778.
- [3] Kohlheyer, D. Miniaturizing free-flow electrophoresis – a critical review / D. Kohlheyer, J.C.T. Eijkel, A. Berg, R.B.M. Schasfoort // Electrophoresis. – 2008. – V.29. – P. 977–993.
- [4] Sakata-Sogawa, K. Direct measurement of DNA molecular length in solution using optical tweezers: detection of looping due to binding protein interactions / K. Sakata-Sogawa, M. Kurachi, K. Sogawa, Y. Fujii-Kuriyama, H. Tashiro // Eur. Biophys. J. – 1998. – V.27, №1. – P. 55–61.
- [5] Skarabot, M. Transport and crystallization of colloidal particles in a thin nematic cell / M. Skarabot, U. Tkalec, I. Musevic // Eur. Phys. J. E. – 2007. – V.24. – P.99-107.
- [6] Lavrentovich, O.D. Nonlinear electrophoresis of dielectric and metal Spheres in a nematic liquid crystal / O.D. Lavrentovich, I. Lazo, O.P. Pishnyak // Nature. – 2010. – V.467. – P.947–950.
- [7] Humar, M. Electrically tunable liquid crystal optical microresonators / M. Humar, Ravnik, M. Pajk S., I. Musevic // Nature Photonics. – 2009. – V.3. – P. 595 – 600.
- [8] Skarabot, M. Direct observation of nanoparticles in a nematic liquid crystal / M. Skarabot, I. Musevic // Soft Matter. – 2010. – V.6. – P. 5476–5481.
- [9] Barany, S. Study of nonlinear electrophoresis / S. Barany, F. Madai, V. Shilov // Prog. Colloid Polym. Sci. – 2004. – V.128. – P. 253–261.
- [10] Barany S. Electrophoresis in strong electric fields / S. Barany // Adv. in Col. and Int. Sci. – 2009. – V.147–148. – P. 36–43.