

СЕНОШЕНКО Рада Владимировна

**ДИНАМИКА И САМООРГАНИЗАЦИЯ АКТИВНЫХ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ В
КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМАХ**

1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель:	д.ф.-м.н., профессор РАН, главный научный сотрудник лаборатории активных кулоновских систем ОИВТ РАН Васильев Михаил Михайлович
Официальные оппоненты:	д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории динамики реагирующих систем ФИАН Кичатов Борис Викторович
Ведущая организация:	д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики Санкт-Петербургского государственного университета Карасев Виктор Юрьевич Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится __ ноября 2026 г. в __ часов на заседании диссертационного
совета Д 002.110.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Объединенного института высоких температур, по адресу 125412, г.
Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких
температур: jiht.ru/science/dissert-council/.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба
направлять по адресу: 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, на имя ученого
секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан 1 сентября 2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.110.02
кандидат физико-математических наук

А. В. Тимофеев

© Объединенный институт высоких температур РАН, 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

В последние годы физика активной материи является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений современной физики мягкой материи и неравновесных систем. Особый интерес вызывают активные коллоидные системы, частицы в которых способны преобразовывать поступающую извне энергию в собственное направленное движение. Такие системы демонстрируют широкий спектр коллективных явлений, включая самоорганизацию, кластеризацию и вихревое движение. Исследование данных процессов имеет фундаментальное значение для понимания динамики открытых диссипативных систем, находящихся вдали от термодинамического равновесия. Кроме того, активные коллоидные системы рассматриваются как удобные объекты для изучения механизмов коллективной динамики живых систем на микро- и наномасштабе.

Несмотря на существенный прогресс в исследовании активных броуновских частиц, коллективная динамика искусственных активных суспензий и микроэмульсий по-прежнему остаётся недостаточно изученной. Для большинства подобных систем характерно движение в режиме малых чисел Рейнольдса, при которых инерционные эффекты пренебрежимо малы по сравнению с вязким трением, а итоговая динамика определяется балансом гидродинамических, межчастичных и внешних сил. В этих условиях даже слабые возмущения, создаваемые отдельными частицами, способны приводить к возникновению далекодействующих гидродинамических взаимодействий и сложным коллективным эффектам. Вместе с тем большинство экспериментальных исследований сосредоточено на динамике одиночных микропловцов или систем с простой геометрией, тогда как механизмы перехода от индивидуального движения к сложным структурам изучены недостаточно. Особый интерес представляют термофоретически активируемые коллоидные частицы, в системах которых коллективное поведение определяется одновременно гидродинамическими взаимодействиями и процессами передачи импульса в вязкой среде. Недостаток экспериментальных данных о таких системах ограничивает развитие количественных моделей активной материи и затрудняет оценку эффективности преобразования подводимой энергии в направленное движение и коллективную динамику частиц.

Исследование термофоретически активных коллоидных систем открывает возможности для создания автономных броуновских микромоторов и искусственных управляемых микропловцов. Особый интерес представляют задачи направленного массопереноса целевых веществ, управляемого микроперемешивания, а также разработки синтетических протоклеток, способных к автономному движению. Экспериментальное изучение механизмов преобразования внешней энергии в направленное движение, процессов самоорганизации активных частиц и закономерностей коллективной динамики в сложных коллоидных системах является важным как для фундаментальной физики неравновесных систем, так и для создания перспективных микрофлюидных и биомиметических технологий.

Цель работы

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование динамики и самоорганизации активных броуновских частиц различных типов в коллоидных

системах (суспензиях и микроэмульсиях сложного состава) при внешнем воздействии, а также установление механизмов преобразования лазерной энергии в направленное движение на микро- и наноуровне.

Задачи работы

1. Разработка стенда капельной микрофлюидики для получения активных коллоидных частиц (капель микроэмульсии) с функциональными включениями.

2. Исследование коллективной динамики в суспензии янус-частиц в вязкой среде при воздействии лазерного излучения постоянной интенсивности. Выявление характерных этапов эволюции вихревого движения, определение основных кинетических характеристик (скорости, коэффициенты диффузии, кинетическая энергия).

3. Исследование динамики капель микроэмульсии с функциональными включениями (наночастицами магнетита). Получение монодисперсных капель эмульсии вида «масло в воде», содержащих наночастицы магнетита, методом микрофлюидики. Изучение их активного броуновского движения при лазерном воздействии. Проведение оценки коэффициентов диффузии, критерия Пекле и эффективной кинетической температуры.

4. Исследование коллективной динамики внутри уединённой капли микроэмульсии, содержащей янус-частицы. Формирование уединённой капли с янус-частицами внутри. Комплексное изучение вихревой динамики частиц и поступательного движения самой капли при лазерном воздействии: восстановление траекторий движения, зависимостей среднеквадратичного смещения во времени, расчёт коэффициентов диффузии.

5. Количественный анализ механизмов и эффективности преобразования энергии в коллоидных системах. Оценка вклада термофоретического механизма в активное движение. Расчёт поглощённой мощности, градиентов температуры, эффективности преобразования энергии для отдельных частиц, суспензий и капель. Определение гидродинамической эффективности преобразования энергии в вязкой среде и эффективности передачи импульса от включений к каплям микроэмульсий.

Научная новизна работы

Впервые экспериментально исследована эволюция коллективного вихревого движения в суспензии термофоретически активных янус-частиц в вязкой среде при лазерном воздействии. Установлены три последовательных этапа самоорганизации: формирование единого вихря, переходный режим с сужением центральной области и окончательное разделение на два противонаправленных вихря.

Экспериментально показано, что активное броуновское движение капель микроэмульсии типа «масло в воде», содержащих поглощающие наночастицы, может быть инициировано лазерным излучением без протекания химических реакций. Предложен и обоснован подход к оценке эффективной кинетической температуры капель в вязкой среде.

Впервые экспериментально изучена коллективная динамика активных янус-частиц внутри уединённой капли микроэмульсии сложного состава при лазерном воздействии. Обнаружено формирование замкнутых вихревых потоков частиц внутри капли, а также направленное поступательное движение самой капли как целого. Выполнена количественная оценка эффективности преобразования энергии в системе капли

микроэмульсии, содержащей поглощающие включения. Показано, что полная диссипация энергии от всех частиц внутри капли значительно превышает мощность, затрачиваемую на движение самой капли.

Впервые количественно охарактеризован термофоретический механизм активного движения в суспензиях янус-частиц и каплях микроэмульсий сложного состава при лазерном воздействии. Показано, что возникающего перепада температуры на масштабе одиночной поглощающей частицы достаточно для инициирования термофоретического движения, но недостаточно для возникновения конвективных потоков, что подтверждает природу наблюдаемой коллективной динамики.

Научная и практическая значимость

Полученные результаты вносят вклад в понимание коллективной динамики и самоорганизации активных броуновских частиц в вязких средах при малых числах Рейнольдса. Экспериментально исследовано вихревое движение в суспензиях термофоретически активных янус-частиц. Выполнен анализ механизма преобразования энергии лазерного излучения в направленное движение коллоидных частиц, что позволяет уточнить роль локальных температурных градиентов и гидродинамических взаимодействий в динамике активных броуновских частиц. Полученные данные также могут быть использованы при моделировании и верификации моделей активных частиц.

Практическая значимость работы связана с возможностью управления динамикой активных коллоидных частиц различного состава посредством лазерного воздействия. Исследованные коллоидные системы могут служить основой для создания искусственных микромоторов и функциональных систем «умных материалов» с управляемой динамикой. Разработанные экспериментальные методики и подходы к оценке эффективности преобразования энергии могут быть использованы в экспериментальных исследованиях активной материи, а также при совершенствовании технологий адресной доставки веществ и микроперемешивания, конструирования микрореакторов.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальный комплекс для генерации и диагностики активных броуновских суспензий и капель микроэмульсий сложного состава с функциональными включениями, движение которых в вязких средах контролируется лазерным излучением.
2. Экспериментальное обнаружение лазерно-индуцированного активного броуновского движения в суспензии янус-частиц и анализ их траекторий, скоростей и энергий. Коллективные эффекты и формирование вихревого движения с коэффициентом диффузии, на 5 порядков превышающим пассивную броуновскую диффузию.
3. Методика генерации капель микроэмульсии сложного состава, динамика которых обусловлена диспергированными функциональными частицами, поглощающими лазерное излучение, с коэффициентом диффузии $7.8 \cdot 10^{-6}$ см²/с и критерием Пекле $2.2 \cdot 10^5$, характерными для активного броуновского движения.
4. Механизм активности капель эмульсии сложного состава, содержащих функциональные включения (микрочастицы) в дисперсной фазе, заключающийся в комбинации фототермического нагрева поглощающих излучение микрочастиц, возникновения локальных температурных градиентов и генерации потоков в жидкой фазе с передачей импульса от микрочастиц эмульсионной капле.

Степень достоверности результатов и апробация работы

Достоверность полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью в сериях независимых экспериментов, а также согласием с данными, представленными в научных публикациях автора. Также достоверность полученных экспериментальных данных обеспечивалась использованием современного сертифицированного оборудования, прошедшего предварительную калибровку.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных научных конференциях:

- Международные научные семинары «Non-Ideal Plasma Physics» (г. Москва, Россия) 2023-2025
- International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology» (г. Минск, Беларусь) 2022, 2025
- International Conferences on Equations of State for Matter (Эльбрус, Россия) 2022-2026
- International Workshops «Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation» (г. Москва, Россия) 2023-2026
- Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный, Россия) 2021-2026
- 15-я международная конференция-школа молодых ученых "Волны и вихри в сложных средах" (Москва, Россия) 2024
- Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» (Казань, Россия) 2026

VI Школа молодых ученых «Химия и технология биологически активных веществ для медицины и фармации» (Москва, Россия) 2026

Исследования в рамках диссертационной работы поддержаны грантами РФФИ (проекты № 20-12-00345 и № 25-12-00406).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 4 работы в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и международных баз данных (Scopus, Web of Science):

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены лично соискателем. Автором работы проведены все экспериментальные исследования, выполнена обработка видеоданных и расчёт динамических характеристик коллоидных частиц. Создан программный код на языке Python для комплексного анализа массивов координат частиц и расчёта основных динамических характеристик. Соискатель принимал участие в постановке задач, обсуждении результатов, подготовке рукописей статей и представлении докладов на конференциях.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и библиографии. Полный объём диссертации составляет 124 страниц, включая 49 рисунков и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 144 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается общая характеристика диссертации, обосновывается актуальность тематики, формулируются цель исследования и основные задачи. Показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, публикациях автора и структуре диссертации.

В **первой главе** сделан обзор современных исследований в области активных броуновских частиц. Рассмотрены основные физические механизмы направленного движения микрочастиц, а также их коллективная динамика и самоорганизация в коллоидных системах.

В **разделе 1.1** приведены основные сведения об активных броуновских частицах и их движении в вязких средах при малых числах Рейнольдса. Приведены критерии, используемые для описания активного движения, рассмотрен процесс диффузии, а также основные механизмы активного движения искусственных микропловцов. Особое внимание уделено термофоретическому механизму движения, основанному на возникновении локальных температурных градиентов вблизи поверхности частиц. Выполнен анализ современных экспериментальных и теоретических работ, посвящённых индивидуальной и коллективной динамике активных броуновских частиц, формированию вихревых структур, кластеризации и другим процессам самоорганизации в активных коллоидных системах.

В **разделе 1.2** подробно рассмотрены коллоидные системы, использованные в качестве объектов исследования в диссертации: суспензии янус-частиц и микроэмульсии сложного состава с функциональными включениями. Проанализированы особенности движения активных частиц и капель микроэмульсий в вязких средах, а также роль гидродинамических взаимодействий в формировании коллективного движения. Рассмотрены современные представления о механизмах движения термофоретически активных янус-частиц, процессах преобразования внешней энергии в механическое движение и особенностях самоорганизации активных коллоидных систем под действием внешних полей различной природы.

Во **второй главе** представлена методика получения и стабилизации активных коллоидных систем на основе термофоретически активных янус-частиц, а также результаты экспериментального исследования их коллективной динамики в вязкой среде при воздействии лазерного излучения.

В **разделе 2.1** описана методика изготовления активных янус-частиц, использованных для исследования коллективной динамики в эксперименте. В качестве основы применялись сферические частицы меламин-формальдегида диаметром 2.05 мкм, на поверхность которых методом магнетронного напыления наносилось медное покрытие. Далее была приготовлена суспензия янус-частиц в дисперсионной среде (минеральном масле) с повышенной вязкостью, обеспечивающей реализацию условий малых чисел Рейнольдса и возможность детального исследования коллективного движения частиц. Сформирована устойчивая структура, содержащая более тысячи частиц.

В разделе 2.2 представлено описание экспериментальной установки и методик исследования динамики активных коллоидных систем. Для изучения движения активных частиц был разработан экспериментальный комплекс, обеспечивающий одновременное воздействие на частицы лазерным излучением, визуализацию и регистрацию их движения (рис.1).

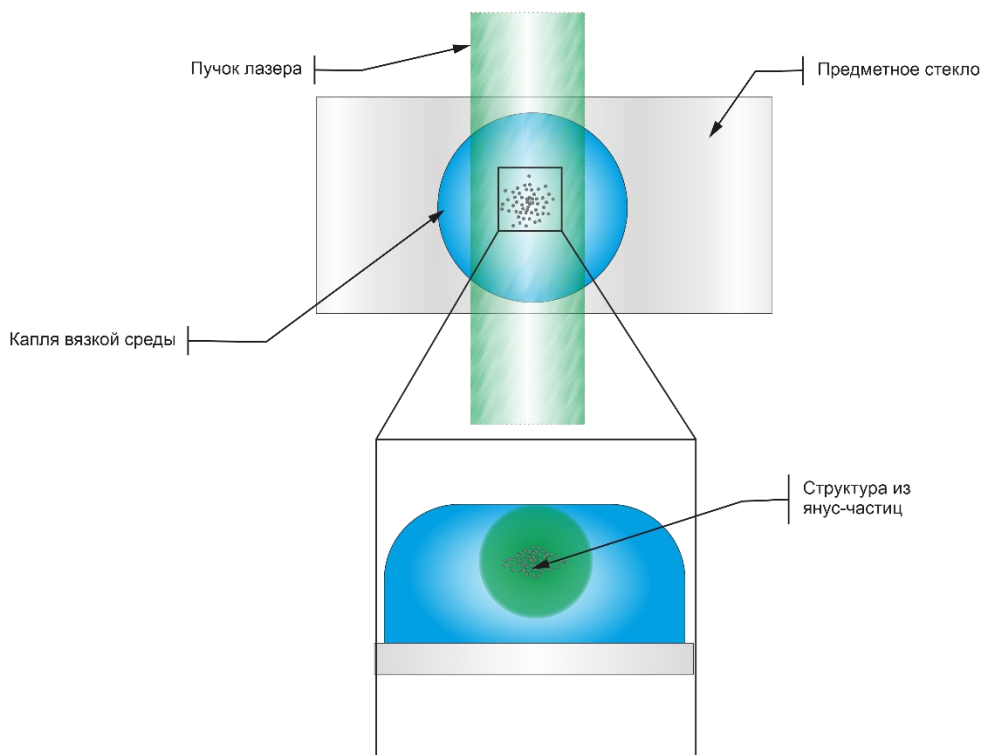


Рисунок 1. Экспериментальный комплекс для воздействия на суспензии активных броуновских частиц при помощи лазерного излучения.

Исследуемая система представляла собой суспензию янус-частиц в вязкой среде, формировавшую квазидвумерную протяжённую структуру. Наблюдение за системой осуществлялось с помощью оптического микроскопа, оснащённого высокоскоростной видеокамерой. Регистрация изображений проводилась в режиме видеосъёмки с последующей компьютерной обработкой экспериментальных данных. Для дальнейшего анализа было использовано специальное программное обеспечение для определения координат частиц и восстановления их траекторий во времени. На основе полученных данных рассчитывались среднеквадратичные смещения, коэффициенты диффузии, скорости движения частиц и другие динамические характеристики.

В разделе 2.3 исследована роль поверхностного заряда в самоорганизации янус-частиц в вязкой среде. Рассмотрены основные механизмы межчастичного взаимодействия, определяющие структуру и динамику активной коллоидной системы. Проведён анализ условий, при которых электростатические силы могут оказывать существенное влияние на движение частиц и процессы их самоорганизации.

Показано, что характер взаимодействия янус-частиц существенно зависит от свойств окружающей среды. В коллоидной плазме частицы способны приобретать заряд порядка

10^4 элементарных зарядов, что приводит к возникновению дальнедействующего кулоновского взаимодействия и формированию упорядоченных структур. В вязких жидких средах наблюдается принципиально иной режим, при котором коллективная динамика частиц определяется преимущественно термофоретическими и гидродинамическими механизмами. Для оценки вклада электростатических эффектов в исследуемой системе выполнен анализ структуры двойного электрического слоя на поверхности янус-частиц и рассмотрены характерные масштабы экранирования заряда в используемой дисперсионной среде (рис.2). Обсуждено возможное влияние асимметрии распределения поверхностного заряда на частицах. Показано, что для исследуемых частиц микронного размера вклад подобных эффектов в коллективную динамику оказывается существенно меньше вклада термофоретических и гидродинамических взаимодействий.

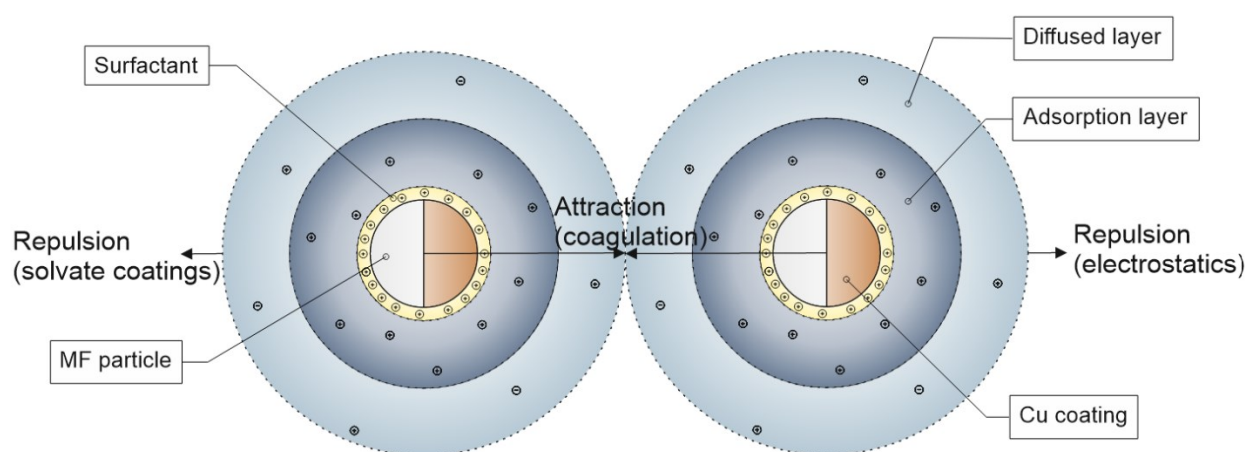


Рисунок 2. Схема взаимодействия двух янус-частиц в структуре.

Приведены оценки характерных межчастичных расстояний и энергий взаимодействия в ансамбле янус-частиц. Показано, что ван-дер-ваальсовы силы и стерические взаимодействия оказываются существенными только при непосредственном сближении частиц и не могут объяснить существование наблюдаемой устойчивой структуры с микронными расстояниями между частицами. Полученные результаты свидетельствуют о том, что определяющую роль в формировании коллективного движения играют процессы передачи импульса через окружающую вязкую среду силами трения.

В разделе 2.4 представлены результаты экспериментального исследования коллективного движения активных янус-частиц в вязкой среде при воздействии лазерного излучения. Показано, что в системе формируются и эволюционируют устойчивые вихревые структуры, характеризующиеся коллективным вращательным движением большого числа частиц. На основе обработанных видеоданных восстановлены траектории движения активных частиц для различных стадий эволюции движения в системе. Установлено, что развитие вихревого движения происходит через несколько последовательных этапов. На начальном этапе формируется единый вихрь, охватывающий всю структуру частиц. В дальнейшем наблюдается переходный режим, сопровождающийся изменением (сжатием) структуры, после чего наблюдается этап с двумя вихрями противоположного направления вращения (рис.3).

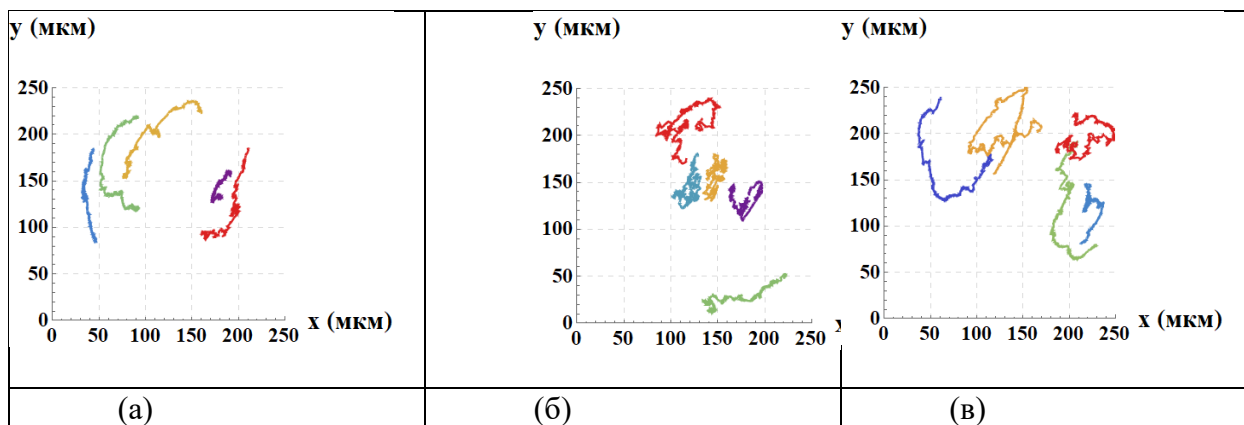


Рисунок 3. Характерные траектории частиц за $t = 180$ с: (а) один вихрь, (б) переходный режим, вторая часть, (в) два вихря.

Для количественного описания коллективной динамики получены функции распределения скоростей частиц для каждого этапа. Анализ распределений показал их отклонение от классического распределения Гаусса. Для режима двух вихрей наблюдается смещение распределений в область отрицательных значений скоростей, что свидетельствует о разделении частиц по динамическим характеристикам. Характерные скорости частиц находились в диапазоне от 1.4 до 2.3 мкм/с, а наиболее вероятные значения составляли несколько микрометров в секунду с учётом занижения скоростей ввиду ограниченного разрешения видеокамеры. Показано, что изменение вихревого движения сопровождается перераспределением скоростей частиц и изменением средней кинетической энергии системы. Средняя кинетическая энергия ансамбля возрастала от $5.6 \cdot 10^{-7}$ эВ на стадии формирования единого вихря до $1.4 \cdot 10^{-6}$ эВ на конечном этапе существования двух вихрей, что указывает на перераспределение энергии в системе в процессе движения. Также установлено, что коэффициенты диффузии для переходного режима и режима двух вихрей составляют $6.1 \cdot 10^{-8}$ и $1.5 \cdot 10^{-7}$ см²/с соответственно, что на несколько порядков превышает коэффициент пассивной броуновской диффузии ($5.4 \cdot 10^{-12}$ см²/с). Рассчитанное для системы число Пекле $Pe \approx 1.5 \cdot 10^4$ свидетельствует о преобладании направленного активного движения над случайным броуновским.

Для различных стадий коллективного движения построены зависимости среднеквадратичного смещения частиц (MSD) от времени, позволяющие охарактеризовать динамику в системе (**рис.4**). Анализ полученных зависимостей показал существенное изменение динамики частиц по мере эволюции вихревого движения. На начальной стадии единого вихря зависимость MSD от времени соответствует режиму кроссовера (переход от баллистического к диффузионному), что характерно для движения частиц в вязких средах. В этом случае перенос определяется как активным движением частиц, так и их вовлечением в крупномасштабный коллективный поток. По мере изменения вихревой структуры и формирования двух противоположных вихрей зависимости MSD характеризуются уменьшением времени баллистического режима.

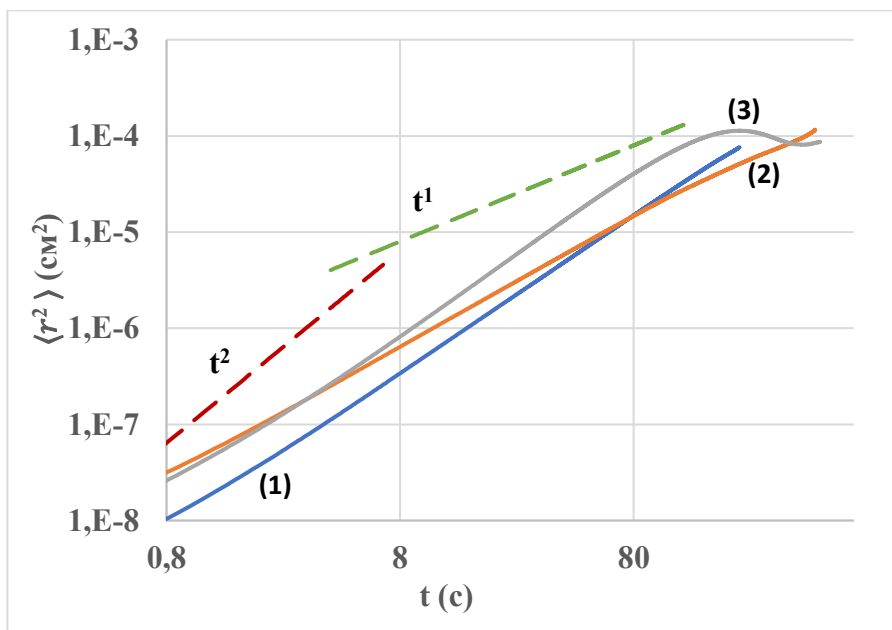


Рисунок 4. Графики зависимостей среднеквадратичного смещения $\langle r^2 \rangle$, усреднённые для всех частиц. (1) – Один вихрь, синяя линия; (2) – Переходный режим, оранжевая линия; (3) – Два вихря, серая линия. Для сравнения приведены зависимости $\langle r^2 \rangle \sim t^2$ – красная пунктирная линия и $\langle r^2 \rangle \sim t^1$ – зелёная пунктирная линия.

Установлено, что коэффициент диффузии возрастает, что свидетельствует об интенсификации массопереноса в системе. Сопоставление полученных коэффициентов диффузии с величиной коэффициента пассивной броуновской диффузии для исследуемых частиц ($D_B = 5.4 \cdot 10^{-12}$ см²/с) показало их превышение более чем на четыре порядка величины. Полученные результаты свидетельствуют о том, что формирование вихревых структур приводит к существенному усилению массопереноса в системе и определяет характер коллективной динамики активных янус-частиц.

В разделе 2.5 сформулированы выводы ко второй главе.

Глава 3 посвящена исследованию активного броуновского движения капель микроэмульсии, содержащих наночастицы магнетита, под воздействием лазерного излучения.

В разделе 3.1 описана методика получения моодисперсных капель микроэмульсии типа «масло в воде», содержащих функциональные поглощающие включения в виде наночастиц магнетита. В качестве дисперсионной среды использовался водный раствор неионогенного стабилизатора Tween-80 с объёмной концентрацией 1.3 %. В качестве дисперсной фазы использовалось минеральное масло с диспергированными магнитными наночастицами, способными эффективно поглощать лазерное излучение. Объёмная концентрация феррофлюида составила 3%. Формирование капель осуществлялось методом капельной микрофлюидики, что позволило получить стабильную микроэмульсию с контролируемым размером капель. Полученные капли микроэмульсии характеризовались узким распределением по размерам (моодисперсностью) и были устойчивы на протяжении всего времени проведения экспериментов благодаря наличию слоя ПАВ на межфазной границе. Средний диаметр капель составлял 65 мкм. После помещения в дисперсионную среду капли формировали в приповерхностном слое квазидвумерный кластер,

использовавшийся в дальнейшем для исследования активного броуновского движения при воздействии лазерного излучения (рис. 5).

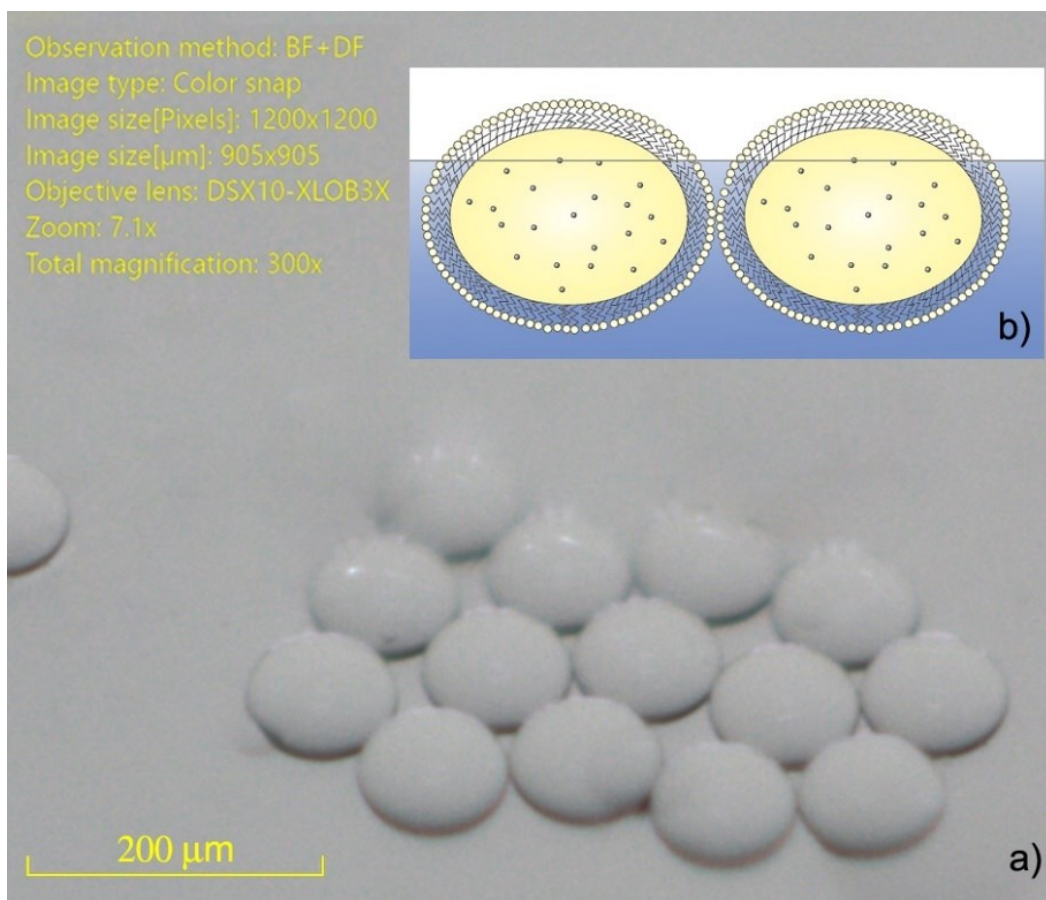


Рисунок 5. (а) Кластер из монодисперсных капель эмульсии вазелинового масла в воде, снятый под углом 45 градусов к нормали поверхности образца. Снимок получен при помощи оптико-цифрового микроскопа Olympus DSX1000 (Токуо, Japan). (б) Схематичное изображение сечения капель микроэмульсии с включениями в дисперсной фазе, стабилизированной лиофобным ПАВ.

В разделе 3.2 представлено описание экспериментальной установки и методики исследования активного движения капель микроэмульсии при воздействии лазерного излучения. Для проведения экспериментов использовался экспериментальный комплекс, обеспечивающий воздействие лазерного излучения постоянной интенсивности и направления на кластер капель микроэмульсии и регистрацию их движения. Исследуемый образец представлял собой кластер из капель микроэмульсии, расположенных в тонком слое водной среды поверх стеклянной подложки (рис.5). Воздействие осуществлялось лазерным излучением с длиной волны 532 нм и плотностью мощности 140 Вт/см², которое эффективно поглощалось наночастицами магнетита, содержащимися внутри капель. Наблюдение за динамикой капель осуществлялось с помощью оптического микроскопа, оснащённого цифровой камерой. Полученные видеозаписи подвергались последующей обработке, включавшей определение координат геометрических центров капель, восстановление траекторий движения и расчёт динамических характеристик. На основе экспериментальных данных определялись мгновенные скорости движения, ускорения, кинетические энергии, среднеквадратичные смещения и коэффициенты диффузии.

В разделе 3.3 представлены результаты экспериментального исследования динамики капель микроэмульсии, содержащих наночастицы магнетита, при воздействии лазерного излучения. Установлено, что при воздействии на систему капли демонстрируют активное движение, обусловленное поглощением лазерного излучения наночастицами магнетита. Для анализа наблюдаемого движения были восстановлены траектории отдельных капель и построены зависимости среднеквадратичного смещения от времени (рис.6). Показано, что при отсутствии излучения кластер капель находится в неподвижном состоянии, а при воздействии лазера постоянной интенсивности капли приходят в движение. Анализ кривых MSD показал наличие направленной составляющей движения. Также определены коэффициенты диффузии капель. Установлено, что эффективный коэффициент диффузии возрастает более чем на порядок по сравнению с пассивной тепловой диффузией для капель аналогичного размера.

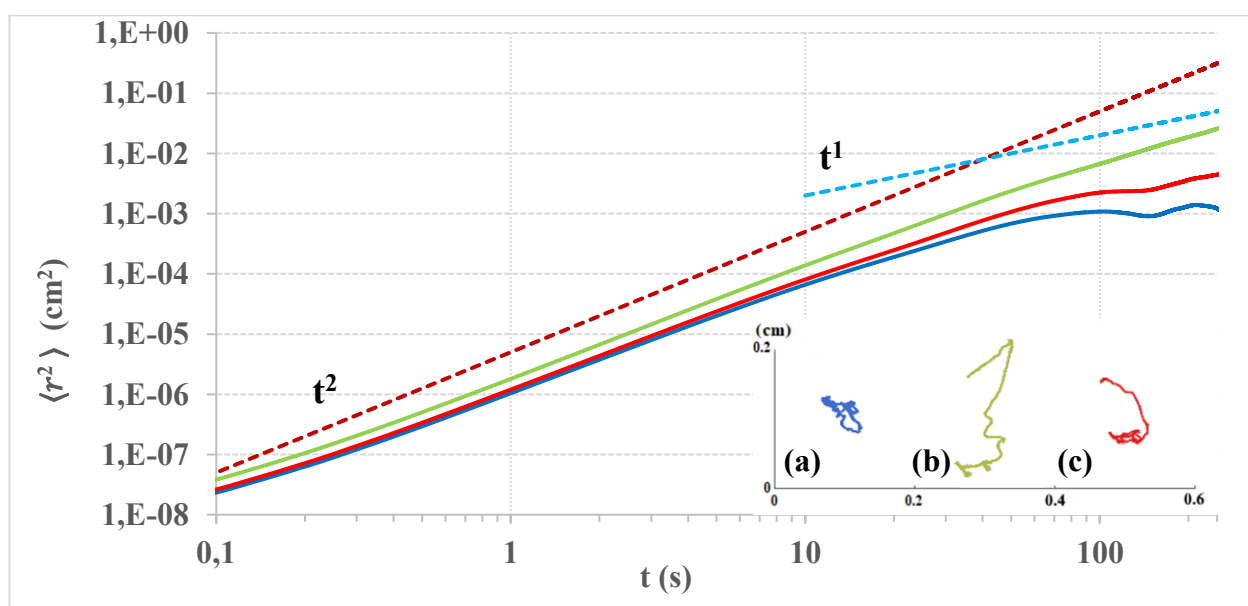


Рисунок 6. Графики зависимости среднего квадратичного смещения $\langle r^2 \rangle$ капель эмульсии от времени. На дополнительной вставке приведены траектории движения капель, цвета которых соответствуют зависимостям MSD: (а) локализованное, (б) с заметным преобладанием направленного движения и (с) комбинированное.

Для характеристики активности системы были рассчитаны эффективная кинетическая температура и число Пекле. На основе экспериментально определённого коэффициента диффузии установлено, что эффективная кинетическая температура капель составляет порядка $3.5 \cdot 10^3$ эВ, что на несколько порядков превышает энергию теплового движения молекул среды и свидетельствует о наличии механизма преобразования энергии лазерного излучения в собственное движение капель. Экспериментально установлено, что средняя наблюдаемая скорость движения капель достигает 11.1 мкм/с, а коэффициент диффузии составляет $7.8 \cdot 10^{-6}$ см²/с, что существенно превышает соответствующие значения для пассивных капель. Дополнительно получена оценка эффективной скорости капли в невязкой среде, составившая около 3 мм/с.

В разделе 3.4 проведён анализ механизма самоорганизации и преобразования энергии в активных каплях микроэмульсии сложного состава. Для количественной оценки вклада активного движения в общую динамику капель рассчитано число Пекле, характеризующее соотношение направленного движения и случайной броуновской диффузии. Для исследуемой системы получено значение $Pe \approx 1.5 \cdot 10^4$, существенно

превышающее единицу. Это указывает на преобладание активного направленного движения над тепловыми флуктуациями и подтверждает активный броуновский характер наблюдаемого движения.

Для объяснения наблюдаемого направленного движения предложен механизм, основанный на поглощающей способности наночастиц магнетита, распределённых в объёме капли (**рис.7**). Поглощение лазерного излучения приводит к нагреву наночастиц и возникновению термофоретической силы. Движущиеся наночастицы передают импульс окружающей масляной фазе через силы вязкого трения, вследствие чего возникает результирующее движение капли как единого объекта. Показано, что эффективность данного механизма определяется коллективным вкладом включений в перенос импульса внутри капли микроэмульсии.

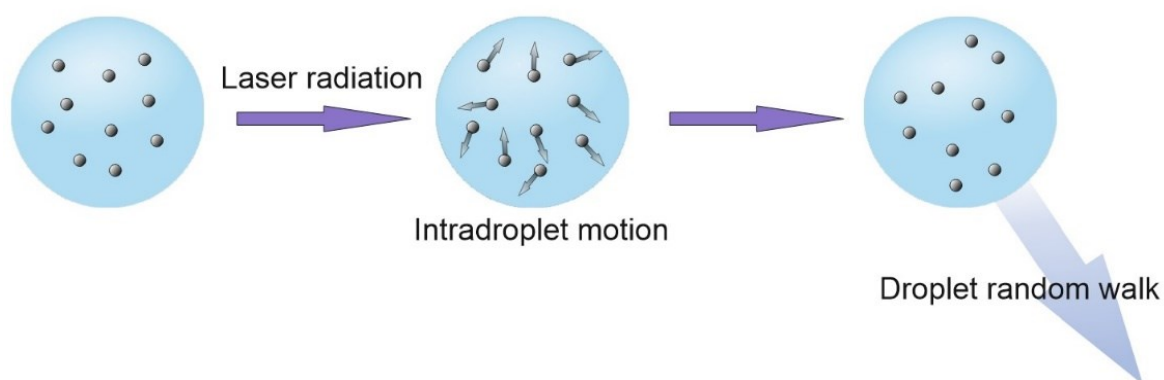


Рисунок 7. Схема механизма активного направленного движения капли микроэмульсии, содержащей наночастицы магнетита.

Выполнен количественный анализ эффективности преобразования энергии лазерного излучения в механическое движение. Для оценки эффективности наночастицы магнетита рассматривались как сферические частицы радиусом 5 нм, их количество в капле было оценено как $1.7 \cdot 10^9$. Установлено, что поглощённая мощность всех наночастиц 1.9 мВт обеспечивает эффективное преобразование энергии лазерного излучения в направленное движение. Полученные оценки показали, что энергетическая эффективность исследуемой системы составляет $1.7 \cdot 10^{-14}$ и находится на уровне значений, характерных для активных микропловцов и термофоретических микромоторов, функционирующих при малых числах Рейнольдса, когда основная часть подводимой энергии расходуется на преодоление вязкого сопротивления среды и диссипирует в объёме окружающей жидкости.

В **разделе 3.5** сформулированы выводы к третьей главе. Проведено сравнение динамических и энергетических характеристик капель микроэмульсии из **главы 3** и активных янус-частиц из **главы 2**. Показано, что средняя скорость движения капель микроэмульсии (11.1 мкм/с) более чем в пять раз превышает среднюю скорость янус-частиц (2.0 мкм/с). Коэффициент диффузии капель микроэмульсии ($7.8 \cdot 10^{-6}$ см²/с) на порядок превосходит значения для активных янус-частиц. Эффективная кинетическая температура капель достигает 3500 эВ, тогда как для суспензии янус-частиц её значение составляет около 702 эВ. Полученные результаты свидетельствуют о более высокой эффективности преобразования внешней энергии лазерного излучения в направленное движение в микроэмульсии сложного состава, содержащей поглощающие включения и находящейся в менее вязкой среде.

В **главе 4** представлены результаты экспериментального исследования коллективной динамики активных броуновских частиц в объёме капли микроэмульсии при воздействии лазерного излучения. Основное внимание уделено установлению связи между внутренней динамикой активных частиц и движением капли микроэмульсии как целого объекта. Рассмотрены процессы самоорганизации системы активных янус-частиц внутри капли, механизм формирования их коллективного потока в дисперсной фазе и их влияние на характеристики движения капли. Исследована передача импульса от активных частиц окружающей жидкости, а также преобразование энергии лазерного излучения в направленное перемещение капли.

В **разделе 4.1** описана методика получения уединённых капель микроэмульсии с функциональными включениями, предназначенных для исследования коллективной динамики активных броуновских частиц в их внутреннем объёме. Уединённая капля эмульсии формировалась механическим способом непосредственно в капле среды на стеклянной подложке. Для предотвращения растекания жидкости предварительно создавалась контактная граница из силиконового масла вязкостью около $0.92 \text{ Па}\cdot\text{с}$, несмешивающегося с водной фазой. Во внутреннюю область сформированного масляного кольца вводилась дисперсионная среда, содержащая поверхностно-активное вещество. Использование поршневого механизма с калиброванным каналом позволяло получать как отдельные капли, так и полидисперсные эмульсионные системы.

В качестве дисперсионной среды использовался водный раствор лаурилсульфата натрия (SLS). Подобрана молярная концентрация ПАВ 8 мМоль , обеспечивающая длительную стабилизацию капель без образования мицелл. В качестве активных броуновских частиц применялись монодисперсные янус-частицы диаметром 2.05 мкм , стабилизированные неионогенным ПАВ Span-80. Основа частиц представляла собой сферу из меламина-формальдегида, на часть поверхности которой было нанесено медное покрытие толщиной 200 нм , обеспечивающее поглощение лазерного излучения. Концентрация янус-частиц в дисперсной фазе составляла $21 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$. Для исследования внутрикапельной динамики была сформирована уединённая капля микроэмульсии сложного состава диаметром 390 мкм , содержащая активные янус-частицы во внутренней фазе. Полученная коллоидная система позволяла как исследовать процессы самоорганизации активных частиц в объёме капли, так и движение капли как единого целого при воздействии лазерного излучения.

В **разделе 4.2** представлено описание экспериментальной установки и методики исследования коллективной динамики активных броуновских частиц в объёме уединённой капли микроэмульсии при лазерном воздействии (**рис.8**). Для воздействия на частицы использовалось лазерное излучение с длиной волны 450 нм и постоянной плотностью мощности 45.14 Вт/см^2 . Регистрация динамики в системе осуществлялась с помощью оптического микроскопа и высокоскоростной видеокамеры, что позволяло одновременно наблюдать движение отдельных янус-частиц и перемещение капли микроэмульсии как единого объекта.

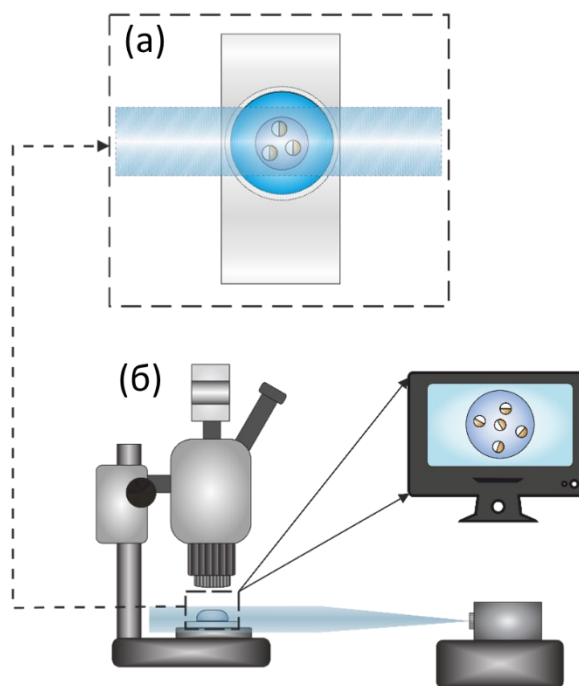


Рисунок 8. Схематичное изображение (а) Воздействия лазерного пучка на предметное стекло с коллоидной системой (вид сверху); (б) Экспериментальной установки для изучения движения в активных коллоидных системах.

Для анализа динамических характеристик применялась компьютерная обработка видеоданных при помощи специального программного обеспечения, включающая определение координат активных частиц на последовательности кадров, восстановление всех траекторий движения и расчёт динамических параметров системы. Дополнительно выполнялось определение координат геометрического центра капли микроэмульсии во времени, что позволило исследовать связь между коллективным движением частиц во внутренней фазе и поступательным движением капли. Разработанная методика обеспечила возможность одновременного исследования двух уровней динамики системы: коллективного движения системы активных броуновских частиц внутри капли и движения самой капли микроэмульсии. Полученные данные использовались для построения траекторий движения, зависимостей среднеквадратичного смещения, определения скоростей и коэффициентов диффузии, а также последующего анализа.

В разделе 4.3 представлены результаты экспериментального исследования коллективной динамики активных броуновских частиц в объёме уединённой капли микроэмульсии при воздействии лазерного излучения. Установлено, что частицы совершают активное движение внутри капли, формируя коллективные потоки. По траекториям активных частиц можно охарактеризовать их движение как сложное вихревое (рис.9а). Наблюдаемая динамика обусловлена термофоретическим механизмом движения, возникающим вследствие локального нагрева металлического покрытия янус-частиц лазерным излучением. Для описания динамики построены зависимости среднеквадратичного смещения частиц от времени (рис.9б). Показано, что характер зависимостей соответствует режиму активного броуновского движения. На временах порядка $t \approx 1$ с обнаружен характерный перегиб кривых, который может быть связан с накоплением частицами энергии, поступающей от лазерного излучения.

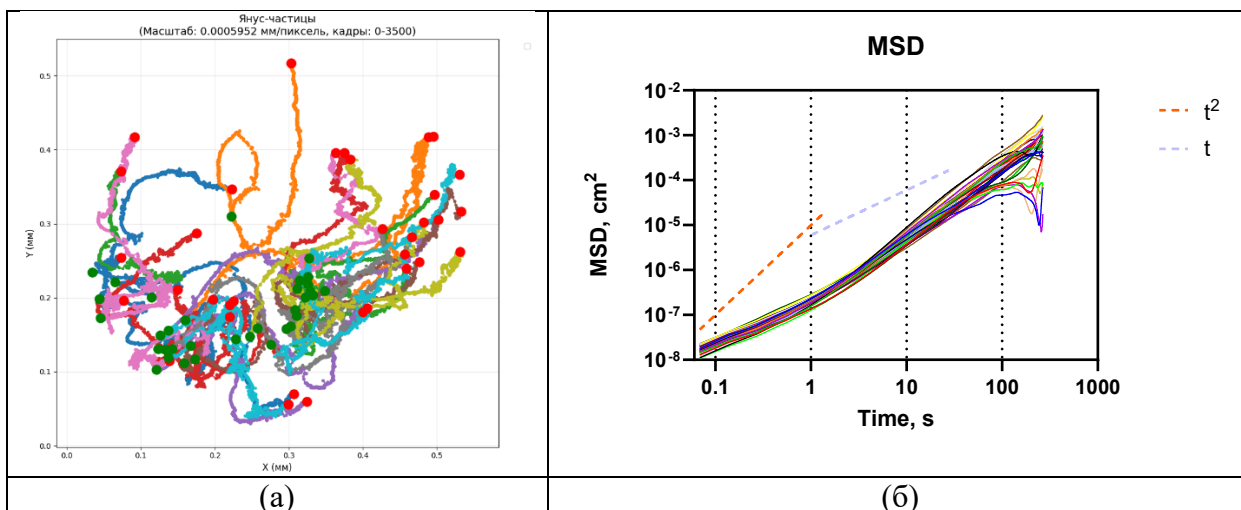


Рисунок 9. (а) Траектории движения янус-частиц в объёме капли микроэмульсии за первые 3500 кадров, (б) Графики зависимости среднеквадратичного смещения янус-частиц от времени.

По восстановленным траекториям определены скорости движения янус-частиц. Средняя скорость частиц внутри капли составила 8.3 мкм/с. Анализ распределения скоростей показал, что все частицы обладают близкими значениями скоростей, а наблюдаемые различия могут быть обусловлены различной долей металлического покрытия на поверхности янус-частиц. Выполнена оценка кинетической энергии частиц. С учётом вовлечённого в движение слоя масла средняя кинетическая энергия одной активной частицы составила около $1.2 \cdot 10^{-3}$ эВ. Поскольку исследуемая капля содержала порядка 10^3 янус-частиц, суммарная энергия их движения достигала ≈ 1.2 эВ.

Также был определён коэффициент активной диффузии. Экспериментально полученный коэффициент диффузии составил $5.35 \cdot 10^{-7}$ см²/с, что более чем на пять порядков превышает коэффициент пассивной броуновской диффузии ($5.36 \cdot 10^{-12}$ см²/с). Полученный результат количественно подтверждает активную природу движения частиц и определяющую роль внешнего воздействия в формировании внутрикапельной динамики.

В разделе 4.4 исследовано влияние коллективной динамики активных броуновских частиц на движение уединённой капли микроэмульсии. На основе анализа видеозаписей определена траектория движения центра масс капли (**рис.10а**) и выполнено сопоставление её динамики с движением янус-частиц во внутренней фазе. Для описания движения построена зависимость среднеквадратичного смещения центра капли от времени (**рис.10б**). Показано, что движение капли носит направленный характер. Анализ зависимости MSD показал преобладание баллистического режима ($MSD \sim t^2$), что свидетельствует о поступательном характере движения микроэмульсии. Установлено, что направленное перемещение капли связано с формированием коллективного потока активных броуновских частиц в результате их самоорганизации в объёме микроэмульсии.

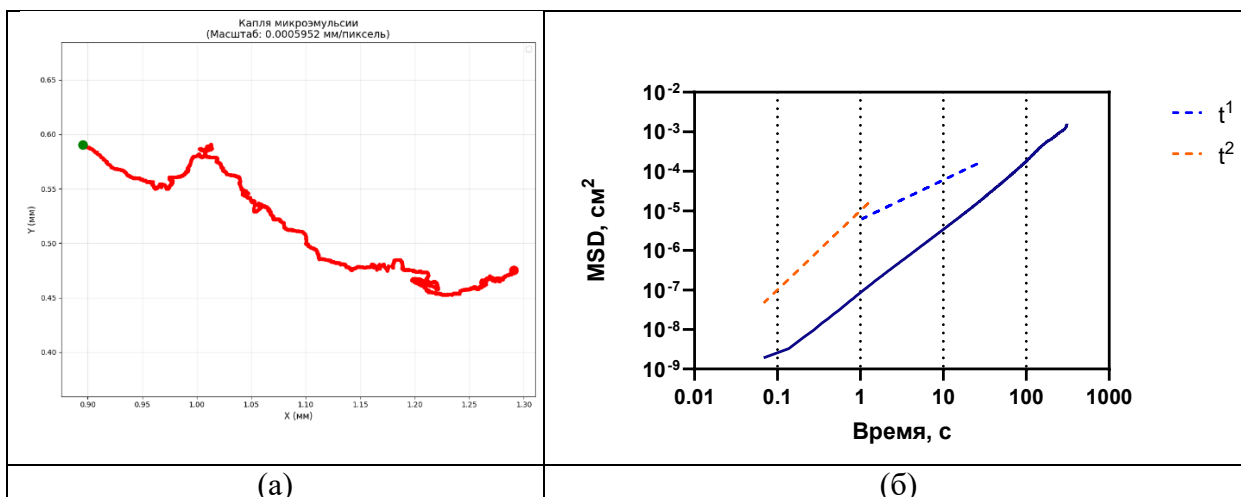


Рисунок 10. (а) Траектория движения капли микроэмульсии за всё время наблюдения, (б) График зависимости среднеквадратичного смещения капли от времени.

Была определена средняя скорость движения капли, составившая 4.1 мкм/с. Различие между скоростью капли и скоростями отдельных частиц обусловлено диссипацией части их кинетической энергии на преодоление сил вязкого трения в масляной фазе. Рассчитанная кинетическая энергия движущейся капли составила $3.4 \cdot 10^{-2}$ эВ. Суммарная энергия движения внутрикапельных включений на порядок превышала кинетическую энергию самой капли.

Для объяснения наблюдаемого эффекта был предложен механизм передачи импульса от активных частиц окружающей жидкой фазе через силы вязкого трения (**рис.11**). Показано, что в условиях малых чисел Рейнольдса фототермический нагрев металлического покрытия янус-частиц лазерным излучением приводит к возникновению локальных температурных градиентов. Активное движение частиц вызывает образование гидродинамических потоков в масляной фазе, которые за счёт дальнедействующих гидродинамических взаимодействий распространяются по всему объёму капли. Передача импульса от системы частиц к межфазной границе приводит к возникновению результирующей силы и направленному движению капли микроэмульсии.

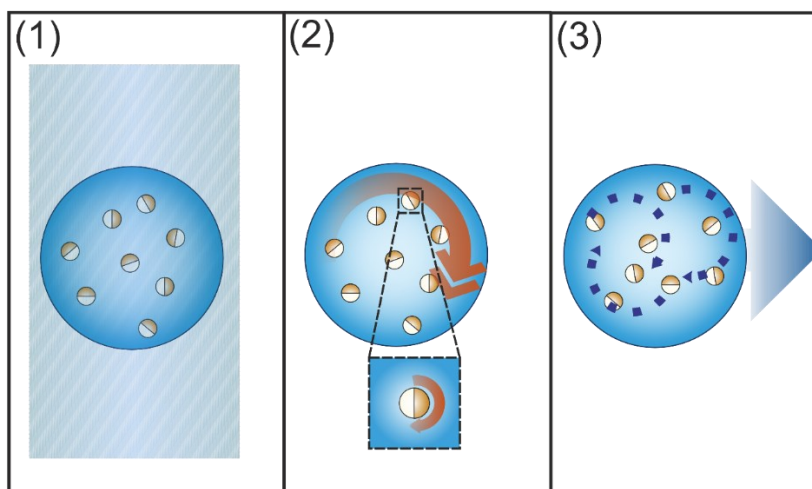


Рисунок 11. Схема механизма активного движения капли микроэмульсии, содержащей активные броуновские частицы в дисперсной фазе, при воздействии лазерного

излучения. (1) Нагрев янус-частиц в капле лазерным излучением, (2) Возникновение температурного градиента в системе, (3) Течения жидкости (минерального масла), вызывающие перемещение капли микроэмульсии.

Предложена методика анализа гидродинамической эффективности, характеризующей передачу импульса от системы активных частиц к капле микроэмульсии. Показано, что эффективность передачи импульса от ансамбля активных частиц к поступательному движению капли составляет $\varepsilon_t \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$, то есть менее 0,03 % суммарной механической мощности активных частиц преобразуется в движение капли. Рассчитанная гидродинамическая эффективность Лайтхилла также равна $\varepsilon_L \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$ и находится в диапазоне, характерном для активных броуновских микрокапель, что согласуется с литературными данными. Выполнена также оценка полной эффективности преобразования энергии лазерного излучения в собственное движение микроэмульсии, которая составляет $\varepsilon_{total} = 1.7 \cdot 10^{-13}$. Полученное значение соответствует величинам, характерным для микропловцов, функционирующих при малых числах Рейнольдса, для которых значительная часть поглощаемой энергии расходуется на преодоление сил вязкого трения и рассеивается в объеме окружающей жидкости.

В разделе 4.5 сформулированы выводы к четвертой главе.

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

1. Экспериментально исследована коллективная динамика активных янус-частиц в вязкой среде при внешнем воздействии лазерного излучения. Описана эволюция вихревого движения в системе, определены динамические характеристики частиц на его различных стадиях.
2. Разработана методика оценки парного потенциала взаимодействия янус-частиц в вязкой неполярной среде. Определены минимальные условия устойчивости формируемой структуры и установлена связь между параметрами межчастичного взаимодействия и коллективной динамикой активной коллоидной системы.
3. Экспериментально получены динамические характеристики активных капель микроэмульсии сложного состава, содержащих наночастицы магнетита. Экспериментально показано возникновение активного движения капель под действием лазерного излучения, определен коэффициент диффузии, эффективная кинетическая температура и эффективность преобразования энергии в системе. Предложен механизм наблюдаемого активного движения капель с учетом функциональной роли наночастиц магнетита.
4. Экспериментально установлена связь между коллективной динамикой активных янус-частиц внутри капли микроэмульсии и результирующим движением капли. Предложен механизм активности микроэмульсии, включающий фототермический нагрев металлического покрытия янус-частиц, формирование локальных температурных градиентов, возникновение коллективных вихревых потоков в масляной фазе и последующую передачу импульса от системы частиц всей капле. Выполнена количественная оценка эффективности преобразования энергии и передачи импульса в системе.

Публикации по материалам диссертации

1. E.A. Kononov, R.V. Senoshenko, M.M. Vasiliev, O.F. Petrov // Active Brownian motion of emulsion droplets driven by nanoscale effects under laser irradiation // Physics of Fluids, Vol.36, Issue 11, pp. 117145, 2024 (doi: 10.1063/5.0240975).

2. Сеношенко Р.В., Кононов Е.А., Васильев М.М., Петров О.Ф. // Вихревое движение в суспензии активных броуновских частиц при воздействии лазерного излучения // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики, т.4, вып. 167, с.594-600, 2025 (doi: 10.31857/S0044451025040133)
3. Р. В. Сеношенко, А. Д. Киверин, И. С. Яковенко, Е. А. Кононов, М. М. Васильев, О. Ф. Петров // Механизм активного движения в коллоидной системе сложного состава, содержащей активные броуновские частицы // Теплофизика высоких температур, / High Temperature. 2026. № 1. С. 5–13. <http://doi.org/10.7868/S3034610X26010187>.
4. Р. В. Сеношенко, Ф. М. Трухачев, Е. А. Кононов, М. М. Васильев, О. Ф. Петров // Волновые процессы в системе синтезированных броуновских частиц // Теплофизика высоких температур / High Temperature. 2026. Т. 64. № 1. С. 1–5.

СЕНОШЕНКО Рада Владимировна

**ДИНАМИКА И САМООРГАНИЗАЦИЯ АКТИВНЫХ БРОУНОВСКИХ
ЧАСТИЦ В КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМАХ**

Автореферат

Подписано в печать 00.00.26	Уч. – изд.л. 1.00	Формат 60x84/16 Усл.-печ.л. 0.93
Печать офсетная	Заказ № 000	Бесплатно
Тираж 100 экз.		

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13/19