

На правах рукописи

ВАЛИУЛЛИНА ВИЛЕНА ИЛЬШАТОВНА



**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ВНЕШНИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ДИНАМИКУ  
РАССЛОЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Уфа – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

**Научный  
руководитель:** **Ковалева Лиана Ароновна**  
доктор технических наук, профессор

## Официальные оппоненты:

**Кислицын Анатолий Александрович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры прикладной и технической физики  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Тюменский государственный университет»

**Моисеев Константин Валерьевич**  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
главный специалист отдела новых технологий добычи  
нефти и газа Общества с ограниченной  
ответственностью «РН-БашНИПИнефть»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Уфа

Защита состоится «02» октября 2025 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.05 при Уфимском университете науки и технологий по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Уфимского университета науки и технологий <https://uust.ru/dc/dissertations/>

Автореферат разослан « » 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н., доцент

Ruf -

Киреев Виктор Николаевич

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

Дисперсные системы играют ключевую роль в природных процессах и промышленных технологиях: при создании новых материалов, при повышении эффективности химических реакций, производстве фармацевтических препаратов, нефтедобычи и др. В нефтяной промышленности исследование расслоения дисперсных систем особенно важно, поскольку на разных этапах добычи нефти и производства нефтепродуктов образуются высокоустойчивые системы – водонефтяные эмульсии и суспензии. Их поведение зависит от баланса сил на микроуровне: поверхностного натяжения, вязкости, гравитации и взаимодействий между частицами. Существует множество методов разделения дисперсных систем, таких как химические, механические, термические, но они не всегда эффективны или экологически безопасны.

Несмотря на значительное число теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованиям дисперсных систем, поведение полидисперсных систем изучено недостаточно, поэтому динамика расслоения многофазных систем остаётся сложной для прогнозирования. Ускорение процессов расслоения полидисперсных систем может быть достигнуто путем изменения термодинамических условий и применением внешних физических полей.

Внешние поля способны кардинально изменять динамику расслоения дисперсных систем, но их применение требует понимания взаимосвязи между параметрами воздействия (напряжённость, частота, температура) и структурно-механическими свойствами сред.

Экспериментальное изучение влияния внешних полей (гравитационного, теплового, электромагнитного и их комбинированного воздействия) на динамику расслоения дисперсных систем не только расширяет фундаментальные представления о многофазных системах, но и открывает путь к созданию инновационных технологий, направленных на получение энергоэффективных методов разделения дисперсных систем в нефтехимии и экологически чистых способов очистки воды.

### **Степень разработанности темы исследования**

Вопросы развития исследований, посвященных динамике движения дисперсных систем изучены и освещены в трудах отечественных и зарубежных авторов, таких как Нигматулин Р.И., Ребиндер П.А., Саяхов Ф.Л., Кислицын А.А., Сафиева Р.З., Ахметов А.Т., Ковалева Л.А., Архипов В.А., Пивоварова Н. А., Morimoto T., Morris J.F., Miller R.M., Leighton D., Acrivos A., Phillips R.J. и др., что подтверждает актуальность данной тематики. Их работы повлияли на развитие

исследований, направленных на изучение поведения многофазных сред в гидродинамических системах под действием внешних факторов. Тем не менее, существуют вопросы, требующие дальнейших исследований.

### **Соответствие содержания диссертации специальности**

Соответствует пунктам разделов паспорта данной специальности:

п. 7. Течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, супензии и эмульсии).

п. 16. Тепломассоперенос в газах и жидкостях.

п. 17. Гидромеханика сред, взаимодействующих с гравитационным и электромагнитным полями. Динамика плазмы.

**Цель диссертационной работы** – разработка методов управления фазовым разделением полидисперсных систем при воздействии внешних физических полей (гравитационного, теплового, электромагнитного и их комбинированного воздействия).

### **Задачи исследования**

1. Анализ современных представлений о дисперсных системах и влиянии на них внешних физических полей.

2. Создание модельных дисперсных систем с различными физическими параметрами и свойствами.

3. Создание экспериментальных установок и специальных ячеек для изучения процессов воздействия внешних сил на дисперсную систему.

4. Исследование расслоения моно- и полидисперсных систем под действием гравитационных сил.

5. Изучение влияния внешних полей (гравитационного, теплового, электромагнитного и их комбинаций) на динамику расслоения дисперсных систем в статических и динамических условиях.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Методика экспериментальных исследований расслоения полидисперсных эмульсий, основанная на учёте распределения капель дисперсной фазы по размерам, вязкости дисперсионной среды и температурных условий.

2. Эмпирические зависимости эффективной вязкости дисперсной системы от температуры и объемной концентрации дисперсной фазы, отражающие комплексное влияние термических и композиционных факторов на реологические свойства эмульсий.

3. Результаты исследования влияния полидисперсности на динамику осаждения дисперсной фазы и время полного расслоения системы.

4. Результаты экспериментального изучения влияния гравитационного, теплового и электромагнитного полей и их комбинаций на процессы коагуляции и коалесценции дисперсной фазы и

расслоения эмульсий, которые позволяют регулировать скорость и полноту расслоения в зависимости от заданных параметров и свойств дисперсной системы.

### **Научная новизна работы**

1. Предложена методика экспериментальных исследований изучения динамики расслоения полидисперсных эмульсий при комбинированном влиянии теплового и электромагнитного воздействия. Разработанный подход позволяет учитывать как коагуляцию и коалесценцию капель, так и гидродинамические эффекты, определяющие скорость разделения фаз.

2. Получены эмпирические зависимости реологических свойств полидисперсных эмульсий при совместном влиянии температурного и концентрационного полей.

3. Выявлены особенности и принципиальные отличия влияния тепловой конвекции на процессы гравитационного расслоения эмульсий типа «вода в масле» при отсутствии и наличии электромагнитного воздействия.

4. Показана эффективность использования электродов особой «зубчатой» конфигурации при воздействии ЭМ полей НЧ и ВЧ диапазонов на процесс управления расслоением эмульсионных систем.

### **Научная и практическая значимость**

Решение поставленных задач позволит получить важные закономерности разделения стабильных эмульсионных систем при электромагнитном воздействии в условиях естественной и вынужденной конвекции, что позволит не только препятствовать образованию нефтяных шламов и качественно их утилизировать, но и улучшить качество товарной нефти за счет снижения её обводнённости.

**Обоснованность и достоверность** результатов исследования подтверждается комплексным подходом, включающим использование высокоточного и аттестованного оборудования для проведения экспериментов. При анализе полученных данных применялись фундаментальные уравнения гидромеханики многофазных сред, что обеспечивает их интерпретацию в строгом соответствии с физическими законами.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации, были представлены на следующих конференциях: Международная конференция-школа «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения» (2016, 2018, 2023); Межрегиональная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Теоретические и экспериментальные исследования нелинейных процессов в конденсированных средах» (Уфа, 2018-2024); Международная школа-конференция студентов, аспирантов

и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании» (Уфа, 2016, 2021, 2022-2024); Всероссийская конференция с международным участием, посвященной памяти академика А.Ф. Сидорова «Актуальные проблемы прикладной математики и механики» (2022); XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2023); XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2021, 2022, 2024); International Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics» (St. Petersburg, 2020-2022); Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (2019-2023); Международная молодежная научная конференция «Наукоемкие технологии в решении проблем нефтегазового комплекса» (2018); Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (2019, 2020, 2023); Международная конференции «Физика.Спб» (2022, 2023); Международная молодежная научно-практическая конференция «Математическое моделирование процессов и систем» (2023); Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская теплофизика» (2023).

### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач были использованы методики измерения параметров дисперсных систем в условиях внешних воздействий, а именно: ротационная вискозиметрия для измерения вязкости жидкостей; оптическая микроскопия для анализа размеров капель; методы трекинга частиц для изучения течений под действием гравитации; электрогидродинамические методы с контролем напряженности и частоты поля; аналитические методы, включающие в себя расчет критериев подобия, статистический анализ (определение распределения капель по размерам), корреляционный анализ для установления связи между параметрами полей.

### **Личный вклад соискателя**

Формулировка и постановка задач, анализ результатов осуществлены совместно с научным руководителем Ковалевой Л.А. Экспериментальные и аналитические исследования, расчеты, обработка, оформление результатов, проведены автором самостоятельно.

### **Публикации**

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 16 научных работах, в том числе 3 научные статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Scopus, 1 – в журнале, входящем в базу данных RSCI, 2 научные

статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 10 – в изданиях, входящих в РИНЦ.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 104 страницы, 60 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 97 наименований.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю д.т.н. Ковалевой Л.А. за помощь при постановке задач, советы и поддержку, доценту к.ф.-м.н. Мусину А.А. за консультации по вопросам реализации экспериментальных исследований, а также аспиранту Галееву Р.Р. за помощь в сборке экспериментальных установок.

### **Работа выполнена при поддержке**

1. Грант Российского научного фонда № 19-11-00298 «Экспериментальные исследования и математические модели термогидродинамических процессов в гетерогенных дисперсных системах под воздействием внешних физических полей».

2. Грант Республики Башкортостан в форме субсидий в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых – аспирантов и кандидатов наук (шифр конкурса: НОЦ-ГМУ-2022) «Экспериментальное исследование и математическое моделирование динамики дисперсных систем под воздействием внешних сил в каналах различной геометрии».

3. Грант Российского научного фонда № 25-27-00181 «Определение способов и условий эффективной переработки нефтяных шламов с последующим извлечением товарной нефти с использованием электромагнитного облучения определенных диапазонов».

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, изложены научная новизна, обоснованность и достоверность результатов, представлена краткая структура работы.

**В первой главе** представлен обзор теоретических и экспериментальных исследований, посвящённых динамике многофазных систем, включая эмульсии и суспензии. Анализ научной литературы за последние два десятилетия выявил значительный интерес к данной тематике. Актуальность этой задачи обусловлена её ролью в оптимизации промышленных технологий: от управления устойчивостью фармацевтических эмульсий до разделения водонефтяных эмульсий в энергетическом секторе. Рассмотрены основные подходы к изучению многофазных течений, включая методы вычислительной гидродинамики

(CFD), реологического анализа и экспериментальной визуализации (микроскопия, PIV).

**Во второй главе** представлены результаты исследования естественного расслоения дисперсных систем под действием гравитационного поля.

**В разделе 2.1** рассматривается осаждение одиночных капель воды в присутствии и отсутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ). Эмульсии без добавления ПАВ характеризуются низкой устойчивостью и быстро расслаиваются. Применение ПАВ обосновано также и тем, что реальные водонефтяные эмульсии типа «вода в масле» являются высокоустойчивыми дисперсными системами, стабилизованными естественными ПАВ нефти, окружающими капли воды в виде прочной оболочки. На рис. 1 приведена зависимость скорости оседания одиночных капель воды, стабилизированных и не стабилизированных поверхностно-активными веществами, в медицинском вазелиновом масле (ГОСТ 3164-78).

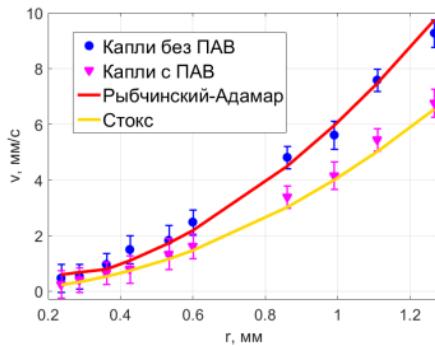


Рис. 1. Зависимость скорости оседания одиночных капель воды, стабилизированных и не стабилизированных ПАВ, от их размеров в вазелиновом масле

Из рис. 1 видно, что динамика осаждения капель, стабилизированных ПАВ, может быть описана классической формулой Стокса, т.е. капли ведут себя как частицы в слабоконцентрированной монодисперсной системе:

$$u = \frac{2gr^2(\rho_k - \rho_{ж})}{9\mu_{ж}}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус капли,  $\rho_{ж}$  – плотность среды,  $\rho_k$  – плотность капли,  $\mu_{ж}$  – коэффициент динамической вязкости среды.

В отсутствии ПАВ оседание одиночных капель в дисперсионной среде описывается формулой Рыбчинского-Адамара, которая учитывает вязкость капель:

$$u = \frac{2gr^2(\rho_k - \rho_{ж})}{3\mu_{ж}} \frac{\mu_{ж} + \mu_k}{2\mu_{ж} + 3\mu_k}, \quad (2)$$

где  $\mu_k$  – динамическая вязкость капли.

В уравнении Рыбчинского-Адамара (2) скорость оседания капли определяется не только её радиусом, но и вязкостью, как внешней среды, так и самой капли. Причем, чем больше был радиус капли, тем больше полученные аппроксимационные кривые отличаются друг от друга.

В реальных системах чаще всего формируются полидисперсные эмульсии, исследование поведения которых является нетривиальной задачей. В полидисперской системе осаждение капель зависит от воздействия окружающих капель, поэтому важно учитывать вязкость системы.

В связи с этим, ротационным методом были исследованы зависимости динамической вязкости окружающей жидкости и эмульсии в зависимости от температуры и концентрации капель воды в эмульсии (рис. 2). Для эмульсии в качестве дисперсионной среды было использовано медицинское вазелиновое масло, дисперсной фазой являлась дистиллированная вода (Milli-Q). Эксперименты проводились при различных концентрациях капель (от 1 до 20%) и температурах (от 20 до 70°C). Измерения проводились относительно начальной температуры  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

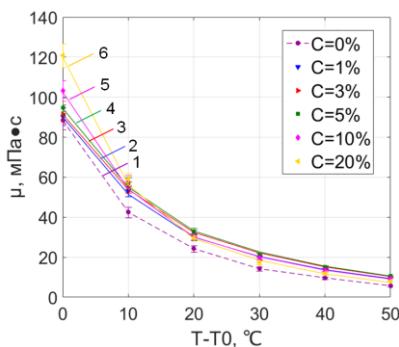


Рис. 2. Экспериментальные зависимости коэффициента динамической вязкости эмульсии от прироста температуры при различной

концентрации капель: 1 - C=0%, 2 - C=1%, 3 - C=3%, 4 - C=5%, 5 - C=10%, 6 - C=20%

Из рис. 2 видно, что с повышением температуры коэффициент динамической вязкости эмульсии ожидаемо снижается, при этом увеличение концентрации капель воды до 20%, приводит к увеличению вязкости системы примерно на 30% при минимальном увеличении температуры при  $T-T_0=20^\circ\text{C}$  и практически совпадает при  $T-T_0=50^\circ\text{C}$ , что указывает на ослабление влияния концентрации при высоких температурах.

Полученные на рис.2 экспериментальные кривые хорошо аппроксимируются экспоненциальными зависимостями. Используя формулу Тейлора для малых концентраций и формулу Бринкмана и Роско для больших концентраций, была получена обобщённая эмпирическая зависимость коэффициента динамической вязкости эмульсии от температуры и концентрации:

$$\mu = \mu_0(C) \cdot e^{(-\gamma(C) \cdot (T-T_0))}, \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 70^\circ\text{C} \cdot$$

$$\mu_0(C) = \begin{cases} \mu_{jk1} \left( 1 + 2.5C \left( \frac{\mu_k + 0.4\mu_{jk1}}{\mu_k + \mu_{jk1}} \right) \right), & 0 \leq C \leq C_s \\ \mu_{jk2} (1 - K_0 K_f C)^{-2.5}, & C_s < C \leq 20\% \end{cases} \quad (3)$$

$$\gamma(C) = \gamma_0 + \alpha \cdot C$$

Здесь значения эмпирических коэффициентов  $K_0 K_f = 0,62$ ,  $\gamma_0 = 0,04994 \text{ 1/K}$ ,  $\alpha = 8 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$ .

Полученную систему можно использовать, например, для оценки вязкости эмульсии в технологических системах, а также при моделировании процессов, связанных с нагревом и расслоением концентрированных эмульсий.

**В разделе 2.2** приведены результаты изучения поведения полидисперсных эмульсионных систем в гравитационном поле. Была разработана методика исследования гравитационного расслоения полидисперсных эмульсий, которая заключалась в следующем: на первом этапе необходимо приготовить эмульсии с заданной концентрацией капель воды ( $C = 1 \div 70\%$ ); затем получить фотоизображения образцов исходных эмульсий в специально разработанной ячейке на установке (рис. 3); произвести замер интенсивности прошедшего через ячейку света путем цифровой обработки изображений, сделать пересчёт интенсивности прошедшего

через ячейку света в концентрацию капель и построить калибровочную зависимость. Второй этап включает в себя получение фотоизображений образцов эмульсий с заданной концентрацией капель в ячейке в процессе расслоения с шагом  $t=30$  с, и построение распределения концентрации капель по высоте ячейки в разные моменты времени.

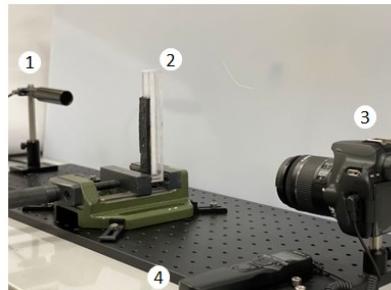


Рис. 3. Фото экспериментальной установки: 1- источник света; 2- экспериментальная ячейка; 3- камера; 4- таймер

В качестве примера приведены результаты экспериментального исследования процесса гравитационного осаждения полидисперсной эмульсии с радиусами капель в диапазоне от 1 до 140 мкм.

Такой подход позволил построить кривые распределения концентрации капель эмульсии по высоте ячейки в разные моменты времени в полулогарифмических координатах (рис. 4).

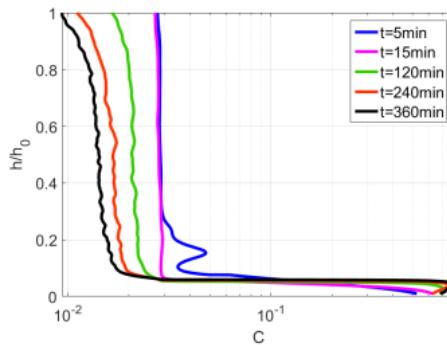


Рис. 4. Распределение концентрации капель эмульсии по высоте при гравитационном осаждении в разные моменты времени

Из рис. 4 видно, что с течением времени концентрация капель в верхней части ячейки снижается, а в нижней части постепенно образуется слой воды с плотной упаковкой капель.

Во время процесса оседания капель эмульсии из ячейки производился отбор образцов для анализа степени дисперсности. Образцы отбирались на разных высотах от поверхности дна ячейки. Исследования по определению размера капель эмульсии во время процесса оседания проводились с использованием инвертированного микроскопа Olympus IX71. В реальных полидисперсных эмульсиях размеры водных капель варьируются в широком диапазоне, что затрудняет их охват в пределах одного разрешения. Поэтому для анализа капель разного радиуса применялись различные оптические увеличения (рис. 5а). Для получения общего количественного распределения плотности частиц, рассчитанные в каждом объеме, были получены с учетом эффективного объема, в пределах которого они были рассчитаны. Таким образом,  $V_1=4V_2=25V_3=100V_4$  (рис. 5б). Глубина обнаружения считалась одинаковой для каждого увеличения.

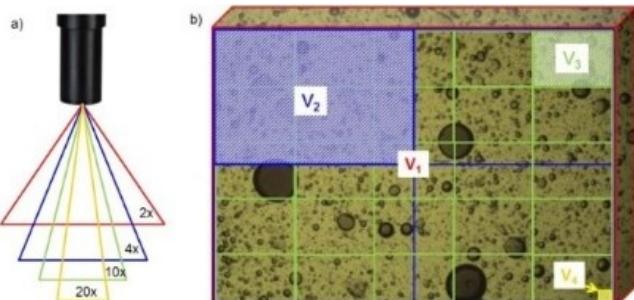


Рис. 5. Схема определения размера капель воды в полидисперсной эмульсии с помощью микроскопа при 2-х, 4-х, 10-ти и 20-ти кратных оптических увеличениях (а); расчета плотности частиц (б)

Предложенная схема дает возможность получить количественное (рис. 6а) и объемное (рис. 6б) распределение капель воды в эмульсии по размерам. Также была построена зависимость высоты отслоившейся фазы от времени (рис. 6в).

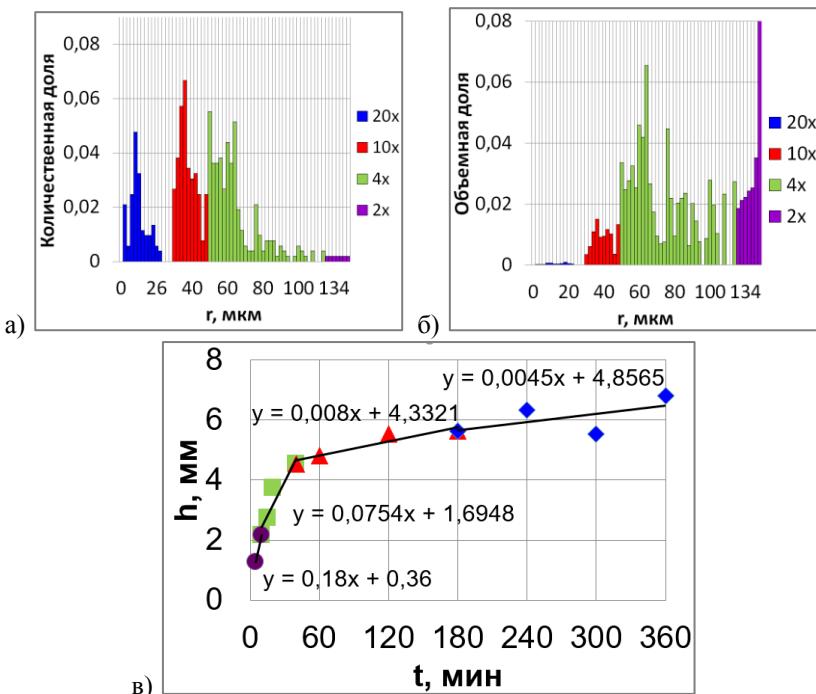


Рис. 6. Распределение капель по размерам (а, б) и высота слоя осевших капель воды в эмульсии (в)

Распределение капель по размерам (рис. 6 аб) позволяет наглядно представить, сколько капель каждого размера присутствует в системе, а также оценить коэффициент полидисперсности капель ( $K_n$ ). При этом объемное соотношение дает возможность оценить вклад капель разного размера в общий объем эмульсии. На рис. 6в можно выделить несколько участков. Первый участок является более крутым, это объясняется тем, что сначала оседают крупные капли воды в эмульсии ( $K_n=1,06$ ). Далее одновременно осаждаются крупные и мелкие ( $K_n=1,23$ ), поэтому седиментационная кривая становится более пологой. После того, как все крупные капли осели, в объеме ячейки остаются только мелкие капли ( $K_n=1,38$ ), которые продолжают оседать, но накопление массы становится меньше за то же время, в связи с чем наклон кривой уменьшается ещё сильнее.

Анализ результатов, приведенных на рис. 4 и 6 показал, что крупные фракции капель осаждаются в течение первого часа (синяя кривая на рис. 4, фиолетовые и зеленые точки на рис 6в), о чём

свидетельствуют об области повышенной концентрации в нижней части ячейки. После чего в ячейке образуется более однородная структура, состоящая из средних и мелких капель воды, которые постепенно осаждаются в течение всего остального времени.

**В третьей главе** рассматриваются процессы расслоения эмульсий при воздействии внешних физических полей и их комбинаций (гравитационного, теплового и электромагнитного). Первоначально эксперименты были проведены на суспензиях, которые с точки зрения гидродинамики являются более простыми в изучении. Гравитационное расслоение эмульсий при тепловом нагреве часто используется на практике, так как не требует сложного и дорогостоящего оборудования. Однако, хотя, нагрев ускоряет процесс за счет снижения вязкости дисперсионной среды, он также инициирует конвекцию, которая препятствует осаждению мелких капель, что может дестабилизировать расслоение. На практике для повышения эффективности расслоения эмульсий используются различные методы разделения дисперсных систем, в том числе воздействие ЭМП, которое оказывает как тепловое, так и силовое влияние на дисперсные системы. Научный интерес представляет исследование комбинированного воздействия этих полей.

**В разделе 3.1** представлены результаты исследования влияния тепловой конвекции на расслоение дисперсных систем. Для этих целей была собрана экспериментальная установка (рис. 7).

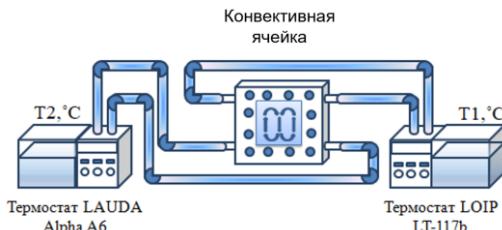


Рис. 7. Экспериментальная установка для исследования теплового воздействия

В результате проведенных экспериментов получены картины течений при разных перепадах температур и траектории потоков капель водной фазы эмульсии при тепловом воздействии методом цифровой обработки изображений. Верхняя грань ячейки поддерживалась при постоянной температуре 23°C, а нижнюю грань нагревали таким образом, чтобы перепад температур в разных экспериментах составлял 5, 10 и 20°C. На рис. 8 приведён результат сложения 40 изображений

при установившемся процессе конвективного перемешивания при тепловом нагреве ячейки снизу.

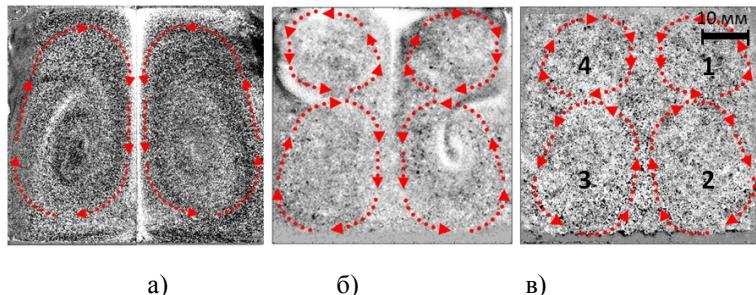


Рис. 8. Направление потоков эмульсионной системы при различных температурах: а)  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ ; б)  $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ ; в)  $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$

На изображениях (рис. 8а) четко прослеживаются два симметричных вихря. Ядра потоков сконцентрированы в нижней части ячейки. На рис. 8б отчетливо видны четыре конвективных вихря, по два в нижней и верхней частях, при этом направление потоков в 1-й и 3-й четвертях направлены по часовой стрелке, а во 2-й и 4-й – против часовой стрелки. Увеличение температуры приводит к обратной смене направлений вихрей (рис. 8в).

Для интерпретации полученных результатов и оценки влияния теплового воздействия были рассмотрены безразмерные числа: Архимеда, учитывающего разность плотностей дисперсионной среды и дисперсной фазы

$$Ar = \frac{gd^3}{\nu^2} \frac{\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \quad (4)$$

и Рэлея, учитывающего перепад температур

$$Ra = \frac{\beta g L^3 \Delta T}{\nu a} \quad (5)$$

Здесь  $\rho_{\text{к}}$  – плотность капли,  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность среды,  $d$  – диаметр капли,  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\beta$  – коэффициент теплового расширения жидкости,  $a$  – коэффициент температуропроводности жидкости,  $L$  – характерный размер ячейки.

Число Архимеда для проведенных опытов в диапазоне диаметров капель  $d = 5 \div 274 \text{ мкм}$  составило  $Ar = 1,6 \cdot 10^{-8} \div 2,6 \cdot 10^{-3}$ . Число Рэлея,

рассчитанное для перепада температур  $\Delta T=5$ ,  $10$  и  $20^{\circ}\text{C}$  равно  $Ra = 2,29 \cdot 10^5$ ,  $4,57 \cdot 10^5$  и  $9,14 \cdot 10^5$ , соответственно.

Кроме того, в экспериментах был реализован контролируемый нагрев сверху так, чтобы температурный градиент был направлен противоположно гравитационному полю, что подавляет развитие восходящих конвективных течений. Нижнюю грань ячейки поддерживали при температуре  $23^{\circ}\text{C}$ , а верхнюю нагревали так, чтобы перепад температур в разных экспериментах составлял  $5$ ,  $10$  и  $20^{\circ}\text{C}$ . На рис. 9 приведена зависимость количества отслоившейся воды в эмульсии при нагреве снизу (синяя кривая 1) и сверху (красная кривая 2) от числа Ra в момент времени  $t=180$  мин.

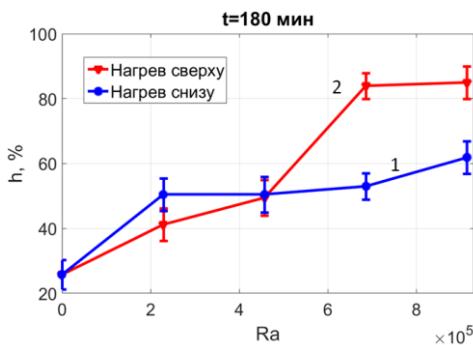


Рис. 9. Зависимость количества отслоившейся воды от числа Ra при  $t=180$  мин

Из рис. 9 видно, что при малых числах Рэлея (до  $Ra=4,5 \cdot 10^5$ ) эффективность расслоения при нагреве снизу выше, чем при нагреве сверху.

С увеличением числа Рэлея конвективные потоки становятся интенсивнее. При доминировании конвекции эффективность расслоения эмульсии снижается. В таком случае нагрев сверху показывает лучший результат, так как при увеличении температуры вязкость эмульсии снижается, и ничего не препятствует расслоению эмульсии.

Проведённый анализ показал, что расслоение эмульсий зависит от соотношения безразмерных чисел Рэлея и Архимеда: при нагреве снизу термоконвективные потоки препятствуют расслоению, а при нагреве сверху они практически отсутствуют, что способствует более эффективному, хотя и значительно более медленному, расслоению эмульсии.

Таким образом, при описании процесса расслоения дисперсных систем необходимо учитывать совокупное влияние трех факторов:

снижение вязкости при нагреве, конвекцию и внешнее силовое воздействие. В гравитационном поле их баланс определяет эффективность разделения фаз. Обычный нагрев, снижая вязкость, ускоряет осаждение частиц, одновременно инициирует конвективные потоки, нарушающие устойчивость системы и препятствующие коалесценции, особенно в присутствии у водных капель оболочек из ПАВ.

**В разделе 3.2** описаны результаты исследования воздействия электромагнитного поля (ЭМП) как альтернативного метода интенсификации расслоения дисперсных систем (рис. 10).

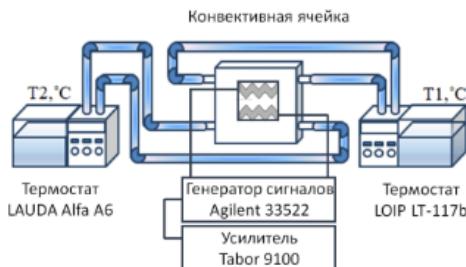


Рис. 10. Схема экспериментальной установки для исследования электромагнитного воздействия в комбинации с нагревом

Представлены результаты экспериментов влияния низкочастотного (НЧ) и высокочастотного (ВЧ) воздействия на дисперсные системы при тепловом нагреве. Рассматривались маломощные электромагнитные поля. При НЧ воздействии частота электрического поля была 500 кГц при напряжении 300 В. Для ВЧ воздействия частота — 8 МГц при напряжении 300 В.

Эксперименты по влиянию НЧ ЭМП были проведены в присутствии теплового воздействия снизу при  $Ra=2,29\cdot10^5$  и  $Ra=4,57\cdot10^5$  (рис. 11).

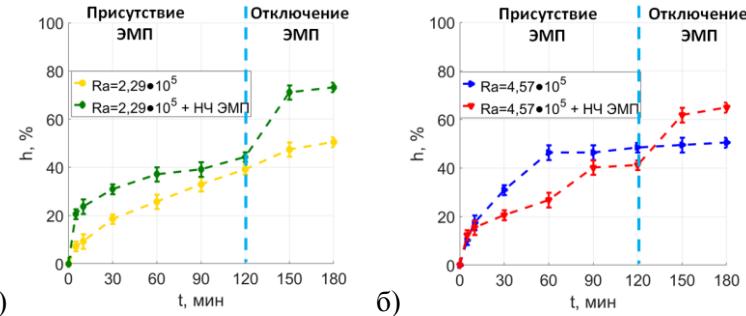


Рис. 11. Зависимость высоты отслоившейся воды в эмульсии от времени при нагреве снизу и НЧ ЭМП а)  $Ra=2,29\cdot10^5$ , б)  $Ra=4,57\cdot10^5$

Из рис. 11а видно, что уровень отслоившейся воды значительно увеличивается после отключения электромагнитного поля. Это связано с тем, что во время электромагнитного воздействия капли воды собираются в областях максимальной напряженности поля, а после отключения поля оседают на дно ячейки. Причем при увеличении температуры ситуация не меняется. При увеличении числа Рэлея интенсивность конвективных потоков усиливается, что препятствует расслоению эмульсии (рис. 11б). Аналогичные эксперименты были проведены при нагреве сверху (рис. 12).

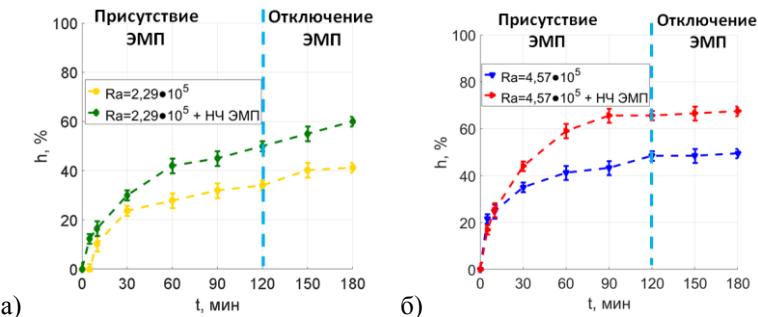


Рис. 12. Зависимость высоты отслоившейся воды в эмульсии от времени при нагреве сверху и НЧ ЭМП а)  $Ra=2,29\cdot10^5$ , б)  $Ra=4,57\cdot10^5$

Рис. 12 показывает, что при нагреве сверху электромагнитное поле вносит незначительный вклад в расслоение эмульсии, поскольку в отсутствие выраженной конвекции электродинамические силы не способны существенно изменять траектории движения капель и ускорять их коалесценцию.

На рис. 13 представлена зависимость высоты отслоившейся воды в эмульсии от времени при нагреве снизу и ВЧ ЭМП.

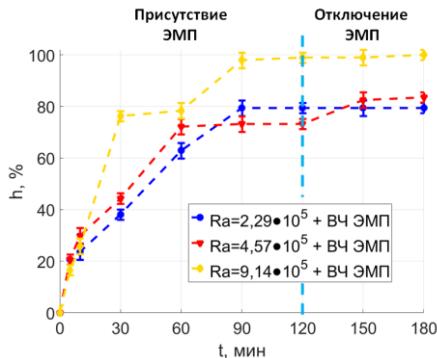


Рис. 13. Зависимость высоты отслоившейся воды в эмульсии от времени при нагреве снизу и ВЧ ЭМП

В ходе экспериментов, результаты которых приведены на рис. 13 было замечено, что при воздействии на эмульсию ВЧ полем процесс оседания капель был интенсивнее, чем при воздействии НЧ полем. Наблюдалось, что при ВЧ воздействии капли коалесцировали в межэлектродном пространстве и сразу же оседали. При ВЧ ЭМ воздействии за  $t=60$  мин количество отслоившейся воды достигает такого же значения как при НЧ ЭМ за  $t=180$  минут. Это связано с тем, что при наложении НЧ поля коагуляционные цепочки удерживаются дольше за счёт диэлектрических сил до набора определённого количества капель, так как  $F_{DEP}(500\text{кГц}) > F_{DEP}(8000\text{кГц})$  в 2,2 раза, что связано с зависимостью диэлектрических параметров среды от частоты приложенного поля. Во всех экспериментах наиболее интенсивное образование коагуляционных цепочек наблюдалось к моменту времени  $t=120$  мин, поэтому в это время происходило отключение электрического воздействия.

В статическом режиме комбинированное воздействие перепада температуры и электромагнитного поля позволяет контролировать расслоение за счёт термоконвекции и электродинамических эффектов. Однако в ряде технологических процессов, например, в проточных системах, перепад температуры может быть несущественным, а ключевую роль играет перепад давления.

В разделе 3.3 рассмотрено влияние электромагнитного воздействия в динамическом режиме, где разделение фаз происходит в потоке (рис. 14).

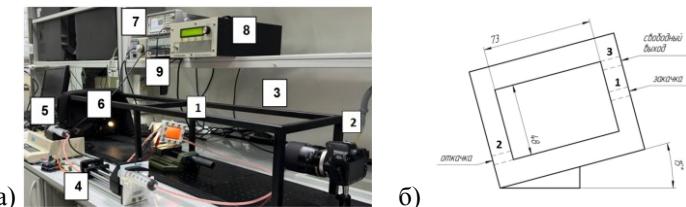


Рис. 14. Экспериментальная установка (а), где 1 – экспериментальная ячейка; 2 – фотоаппарат; 3 – кожух; 4 – шприцевой насос 1; 5 – шприцевой насос 2; 6 – источник света; 7 – генератор НЧ; 8 – генератор ВЧ; 9 – усилитель и ячейка (б) для исследования влияния вынужденной конвекции

Исследования влияния электромагнитного поля (ЭМП) на расслоение эмульсии проводилось в ячейке с наклоном  $15^\circ$  при НЧ и ВЧ электрическом воздействии. Изначально все эксперименты с ЭМП проводились с использованием прозрачных проводящих стекол с напылением оксида индия и олова (ITO). На рис. 15 приведены зависимости количества отслоившейся воды в наклонной ячейке в присутствии ЭМП. Видно, что при использовании плоских электродов (рис. 15а) ВЧ ЭМП не оказывало влияния на расслоение эмульсии. В то же время, НЧ воздействие мешало расслоению, что связано с тем, что при такой конструкции ячейка выступала в роли конденсатора, и капли воды собирались в областях между стеклами.

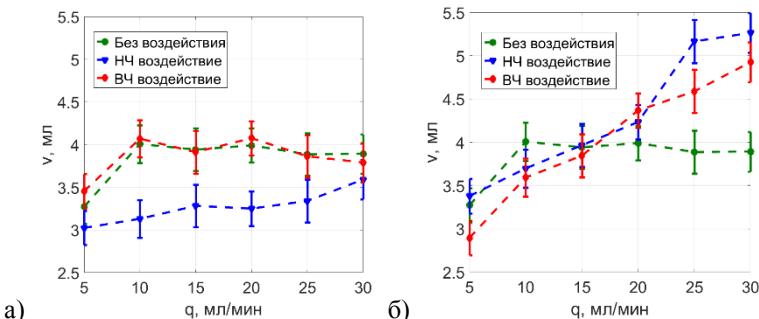


Рис. 15. Зависимость количества отслоившейся воды от расхода жидкости в ячейке с плоскими (а) и зигзагообразными (б) электродами

После травления зигзагообразных вертикальных электродов на ITO-стеклах (рис. 15б) было обнаружено, что коалесценция воды происходит в областях максимальной напряженности ЭМП. Электроды

существенно повышают эффективность расслоения полидисперской эмульсии при электромагнитном воздействии. Под действием ВЧ ЭМП бронирующие оболочки водных глобул становятся нестабильными и разрушаются, способствуя коалесценции капель и формированию сплошного слоя воды, который уносится потоками жидкости. Интенсивность этого процесса возрастает с увеличением расхода жидкости. При НЧ воздействии капли задерживаются в межэлектродном пространстве до отключения поля, однако при повышении расхода жидкости также уносятся потоком.

На рис. 16 приведены зависимости распределения капель воды в эмульсии по размерам до воздействия, а также после НЧ и ВЧ электромагнитного воздействия.

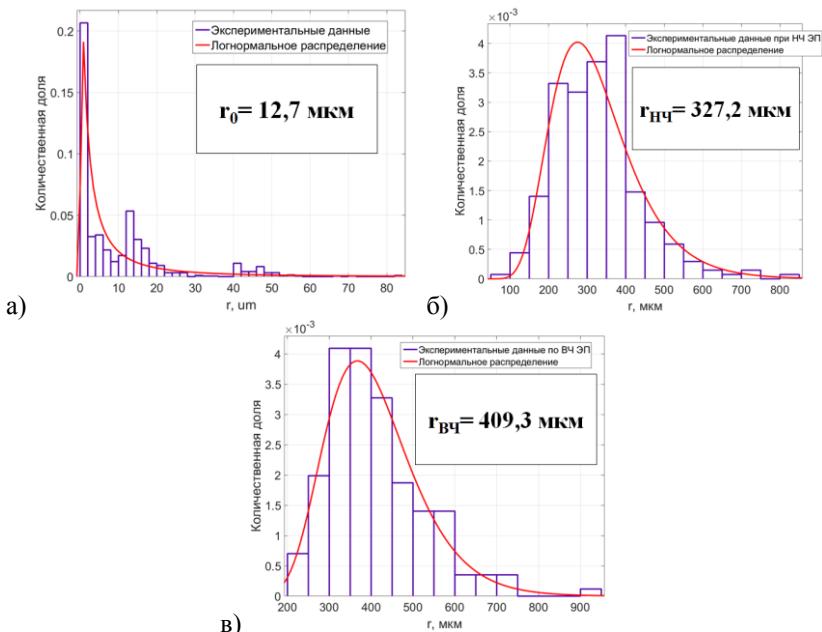


Рис. 16. Гистограмма распределения капель по размерам: а) до воздействия; б) после НЧ; в) после ВЧ воздействия

Средний радиус капель сходной эмульсии составил  $r_0 = 12,7 \text{ мкм}$ , средний радиус капель воды после НЧ воздействия –  $r_{\text{НЧ}} = 327,2 \text{ мкм}$ , средний радиус капель воды после ВЧ воздействия –  $r_{\text{ВЧ}} = 409,3 \text{ мкм}$ . Это доказывает более высокую эффективность воздействия ВЧ полем на эмульсию типа «вода в масле» по сравнению с НЧ воздействием.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы:

1. В результате экспериментальных исследований гравитационного осаждения одиночных капель воды в масле показано, что при наличии у капель оболочки из поверхностно-активных веществ (ПАВ) их осаждение может быть описано формулой Стокса по аналогии с оседанием частиц в суспензии.

2. Предложена эмпирическая зависимость вязкости полидисперсных систем в неизотермических условиях от концентрации окружающих капель и температуры.

3. Разработана методика экспериментального исследования расслоения полидисперсных эмульсий, основанная на измерении интенсивности пикселей с последующим применением цифровой обработки изображений и позволяющая оценивать распределение концентрации водных капель эмульсии по высоте.

4. Установлено, что нагрев эмульсии снизу вызывает тепловую конвекцию, которая препятствует процессу осаждения капель, и этот эффект зависит от соотношения безразмерных чисел Рэлея и Архимеда; при нагреве сверху термоконвективные потоки практически отсутствуют, что способствует более эффективному, хотя и значительно более медленному, расслоению эмульсии.

5. Выявлены особенности воздействия низкочастотного и высокочастотного электромагнитных полей на эмульсию в сочетании с тепловым воздействием. Показано, что ВЧ ЭМ воздействие значительно (в проведенных экспериментах более, чем на 30%) эффективнее НЧ ЭМ воздействия. Причем, в отличие от гравитационного осаждения в сочетании с нагревом снизу, в случае ВЧ ЭМ воздействия в таких же условиях можно достичь 100%-го расслоения эмульсии за счет разрушения бронирующих оболочек ПАВ на поверхности капель, что в комбинации с хаотичными конвективными потоками способствует их коалесценции и ускоренному расслоению.

6. В динамических условиях вынужденной конвекции установлено, что увеличение расхода жидкости способствует активному выносу капель из межэлектродного пространства, что повышает эффективность электромагнитного воздействия, а влияние поля приводит к их активному слиянию с увеличением среднего размера капель.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

**В изданиях из перечня Web of Science/Scopus**

1. Valiullina V. I., Musin A. A., Zamula Yu S Kovaleva L. A. Determination of correlation dependences of emulsion viscosity on the

concentration of water droplets under non-isothermal conditions //St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – T. 16. – №. 1.2. – C. 343-348.  
<https://doi.org/10.18721/JPM.161.252>

2. Mullayanov A.I., Musin A.A., Valiullina V.I., Kovaleva L.A. The features of the microemulsion structure changes under the nonhomogeneous alternating electric field impact //Letters on materials – 2024 – T.14 – №1 – C.57-61 <https://doi.org/10.48612/letters/2024-1-57-61>

3. Musin A.A., Valiullina V.I., Yulmukhametova R.R., Kovaleva L.A. Experimental and numerical investigation of the isothermal stratification of a polydisperse emulsion with the use of the quasi-monodisperse approach. //Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2024. – T. 97. – №. 4. – С. 885-894. <https://doi.org/10.1007/s10891-024-02958-3>

#### **В изданиях из перечня РСКИ:**

4. Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А., Валиуллина В.И., Ковалева Л.А. Математическое моделирование течения суспензии в системе пересекающихся трещин //Сибирский журнал индустриальной математики. – 2023. – Т. 26. – № 1. – С. 201-211.  
<https://doi.org/10.33048/SIBJIM.2023.26.118>

#### **В изданиях из перечня ВАК:**

5. Замула Ю. С. Валиуллина, В. И., Мусин, А. А., Ковалева Л.А. Экспериментальное моделирование динамики осаждения твердых сферических частиц, диспергированных в вязкой жидкости //Вестник Башкирского университета. – 2019. – Т. 24. – №. 4. – С. 794-798.  
[https://doi.org/10.33184/bulletin-b\\_su-2019.4.4](https://doi.org/10.33184/bulletin-b_su-2019.4.4)

6. Тулубаева Р.Р., Хасанова Я.Р., Валиуллина В.И., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Экспериментальное исследование особенностей осаждения одиночных капель и частиц в вязкой жидкости //Вестник Башкирского университета. – 2024. – Т. 29. – №. 4. – С. 196-201.  
<https://doi.org/10.33184/bulletin-bsu-2024.4.4>

#### **В изданиях из перечня РИНЦ:**

7. Valliullina V. I., Zamula Yu S., Mullayanov A. I., Iulmukhametova R.R., Musin A.A., Kovaleva L.A. Experimental and numerical study of the water-in-oil emulsion thermal motion in rectangular cavity with a heated bottom// Advanced problem in mechanics. – Springer Nature, 2022. – №.2. – pp.117-125. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92144-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92144-6_9)

8. Tukhbatova E. R., Zamula Y. S., Valliullina V. I., Musin A.A. Kovaleva L.A. Experimental and numerical study of the natural convection in dispersed systems in a heated rectangular cell //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – T. 1359. – №. 1. – С. 012112.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012112>

9. Valliullina V. I., Mullayanov A. I., Musin A.A., Kovaleva L.A., Kireev V.N. Experimental and numerical study of gravitational sedimentation of the polydisperse water-in-oil emulsion //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – V. 1675. – №. 1. – P. 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1675/1/012025>
10. Valliullina V. I., Mullayanov A. I., Musin A.A., Kovaleva L.A. Experimental study of the stratification of polydisperse emulsions in a cell with heated walls//Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – V. 2057. – №.1. – P.012041 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2057/1/012041>
11. Валиуллина В.И., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Исследование деземульсации стабильных водонефтяных эмульсий при тепловом, НЧ и ВЧ электромагнитном воздействиях. // XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования». Санкт-Петербург, 15-21 мая 2022 г. – с. 235-236
12. Валиуллина В.И. Мусин А.А. Исследование влияния теплового нагрева на процесс расслоения эмульсий типа «вода в масле» //Теоретические и экспериментальные исследования нелинейных процессов в конденсированных средах. – 2021. – С. 225-226
13. Замула Ю.С., Валиуллина В.И., Мусин А.А., Тухбатова Э.Р., Ковалева Л.А. Исследование динамики гравитационного расслоения дисперсной системы в ограниченном пространстве. //Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах. – 2019. – С. 62-63.
14. Валиуллина В. И., Аюпов А.Р., Галеев Р.Р., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Экспериментальное исследование вынужденной конвекции эмульсионной системы в прямоугольном канале //Енисейская теплофизика. – Красноярск, 2023 – с. 226-227
15. Валиуллина В.И., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Экспериментальные исследования влияния свободноконвективных течений на расслоение эмульсии в прямоугольной полости. // XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике. Сборник тезисов докладов. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2023 – С. 920-921.
16. Valiullina V.I., Sultanguzhin R.F., Zamula Yu.S., Musin A.A., Kovaleva L.A. Experimental study of the thermal motion of a model emulsion in a rectangular cavity with heating walls. //XLVIII International Conference “Advanced Problems in Mechanics”. – 2020. – P. 73.