

На правах рукописи



Фатталов Оскар Олегович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТВЕРДЫХ  
И ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЖИДКОСТИ В ВИБРАЦИОННОМ  
И АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЯХ**

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ).

<b>Научный руководитель:</b>	<b>Любимова Татьяна Петровна</b> , доктор физико-математических наук, профессор.
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Гималтдинов Ильяс Кадирович</b> , доктор физико-математических наук, член-корреспондент АН РБ, профессор кафедры физики ФГБОУ ВО УГНТУ «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа); <b>Субботин Станислав Валерьевич</b> , кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и технологии ФГБОУ ВО ПГПУ «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет» (г. Пермь).
<b>Ведущая организация:</b>	ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится **«3» марта 2022 г. в 14.00 часов** на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: [www.icmm.ru](http://www.icmm.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_» января 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, доцент



А.Л. Зуев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.** Диссертация посвящена экспериментальному исследованию динамики многофазных систем в вибрационном и акустическом полях. Использование переменных внешних воздействий на многофазные системы в медицине, машиностроении, горнодобывающей, нефтеперерабатывающей, фармацевтической и химической отраслях промышленности позволяет оптимизировать существующие процессы, снизить затраты на производство и обеспечить хорошие экономический и экологический эффекты.

Несмотря на глубокую проработанность различных задач, связанных с поиском фундаментальных закономерностей поведения многофазных систем при наличии вибраций, многие вопросы требуют дальнейшего развития, особенно в задачах, связанных с динамикой сложных многофазных гидродинамических систем в присутствии различных примесей. Для неакустических вибраций, для которых сжимаемостью сред можно пренебречь, требует дополнительного исследования вопрос о возникновении структур в суспензиях и эмульсиях. Для вибраций ультразвуковой (УЗ) частоты в литературе до сих пор появляются противоречивые выводы о динамике кавитационных пузырьков, возникающих в жидкостях. Имеется много работ по исследованию активности кавитационных процессов в жидкостях в сонохимических реакторах, однако вопросы о динамике пузырьков и кавитационных процессах при наличии включений до сих пор остаются недостаточно раскрытыми.

Особый интерес представляет задача о повышении эффективности обогащения минеральных руд методом флотации. В последнее десятилетие началось активное исследование возможности применения ультразвукового воздействия на флотационную пульпу непосредственно в процессе флотации с целью повышения извлечения ценных компонентов руды и снижения потребления химических реагентов.

Диссертационная работа посвящена исследованию поведения многофазных систем при вибрационных и акустических воздействиях и поиску путей повышения эффективности процессов разделения, в частности, флотационного, с помощью таких воздействий.

**Цель работы.** Цель диссертационной работы заключается в определении закономерностей процессов, возникающих в жидкостях с твердыми и газовыми включениями при наличии неакустических вибраций и ультразвука. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Экспериментально и численно исследована динамика формирования структур в вязких жидкостях с твердыми включениями, подвергающихся неакустическим вибрациям;

2. Экспериментально исследованы процессы возникновения, дрейфа и коалесценции пузырьков в объеме жидкости и вблизи твердых поверхностей,

погруженных в жидкости с различными физико-химическими свойствами, при наличии УЗ вибраций;

3. Экспериментально исследована эффективность применения ультразвуковых вибраций в процессах обогащения руд методом флотации.

**Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:**

1. Обнаружено существование трех режимов поведения жидкостей с твердыми включениями при воздействии неакустических вибраций: 1) случайное распределение частиц по объёму, 2) наличие устойчивых пространственно-периодических структур, ориентированных ортогонально направлению вибраций, 3) режим с разделением фаз с границей раздела чистая жидкость – жидкость с включениями, перпендикулярной к направлению вибраций. Найдено, что определяющим параметром, ответственным за существование различных режимов, является амплитуда скорости вибраций.

2. Определены зависимости пространственного периода квазистационарных структур от вязкости жидкости, частоты и амплитуды вибраций. Показано, что пространственный период структур пропорционален толщине вязкого слоя Стокса.

3. В рамках трехмерного подхода численно исследовано поведение ансамбля твердых частиц в вязкой жидкости под действием линейно-поляризованных поступательных вибраций. Обнаружено формирование равноотстоящих друг от друга плоских слоев частиц, перпендикулярных к направлению вибраций.

4. Найдено, что диаметр пузырьков, возникающих в жидкости при УЗ воздействии, значительно уменьшается с увеличением концентрации солей NaCl и KCl вследствие ингибирования коалесценции. Обнаружено, что ультразвуковое воздействие приводит к повышению критической концентрации коалесценции (ККК) для водных растворов соли NaCl более чем в три раза по сравнению со случаем отсутствия УЗ воздействия.

5. Обнаружено, что изменение краевого угла смачивания твердой поверхности с 78 до 99 градусов приводит к увеличению более, чем в сто раз скорости роста относительной площади, занимаемой пузырьками, образовавшимися при УЗ воздействии, на погруженной в жидкость пластине.

6. Исследовано влияние УЗ воздействия на процесс флотации калийных руд. Показано, что для частиц мелкой и средней крупности УЗ обработка увеличивает или оставляет неизменным извлечение KCl, но заметно уменьшает извлечение NaCl. Таким образом, применение УЗ повышает эффективность процесса флотации за счет увеличения селективности извлечения. Этот эффект связан с десорбцией ПАВ с поверхности NaCl под действием УЗ, что приводит к её гидрофилизации.

**Теоретическая и практическая значимость.** Разделение многофазных систем на фазы является одним из этапов многих технологических процессов. Поиск фундаментальных закономерностей процессов, протекающих в таких системах при неакустических вибрациях, может помочь решению задач

сепарации суспензий, эмульсий и их смесей. Понимание и описание процессов, протекающих в многофазных системах при вибрациях ультразвуковой частоты, важно для решения задач оптимизации процессов обогащения руд методом флотации, в частности для разработки лабораторной флотационной машины с ультразвуковым блоком обработки.

**Методология и методы диссертационного исследования.** При выполнении диссертационной работы применялись современные апробированные методы экспериментальных исследований с использованием высокоскоростных видеокамер для регистрации поведения многофазных сред. Методика обработки экспериментальных изображений производилась с помощью методов машинного зрения. В экспериментах по исследованию влияния УЗ воздействия на флотационное обогащение минеральных руд применялись методики и процедуры, аналогичные используемым в отсутствие УЗ воздействия.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментального и численного исследования динамики твердых частиц в вязкой жидкости под действием поступательных линейно-поляризованных неакустических вибраций.

2. Результаты экспериментального исследования динамики пузырьков, возникающих в водных растворах солей NaCl, KCl и ПАВ под действием УЗ вибраций.

3. Результаты экспериментального исследования динамики пузырьков, возникающих под действием УЗ вибраций вблизи погруженных в жидкости твердых пластин с различными поверхностными свойствами.

4. Результаты экспериментального исследования влияния УЗ на флотационное разделение калийных руд.

**Достоверность результатов.** Достоверность результатов исследования подтверждается использованием апробированных методик проведения экспериментов и численных расчетов и соответствием экспериментальных и численных данных, имеющимся в литературе результатам, в частных случаях.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на 14-ти различных конференциях: 1. V-th International congress of theoretical and applied mechanics ICTAM2020+1 2021 (Milan, 2021); 2. XXI и XXII Зимние школы по механике сплошных сред (Пермь, 2019, 2021); 3. Международный симпозиум «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Пермь, 2017, 2021); 4. Всероссийская конференция молодых ученых-механиков (Сочи, 2019, 2020, 2021); 5. XV Всероссийская школа-конференция для молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Шерегеш, 2020); 6. Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Физика для Пермского края» (Пермь, 2020); 7. XXIV Международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» «НЕЗАТЕГИУС» (Москва, 2020); 8. VII Российская конференция «Многофазные системы:

модели, эксперимент, приложения» (Уфа, 2020); 9. XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019); 10. XI Международный форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования» под эгидой ЮНЕСКО (Санкт-Петербург, 2019); 11. XVI международная конференция «Поверхностные силы» (Казань, 2018); 12. Пермские гидродинамические научные чтения (Пермь, 2016, 2018, 2020); 13. Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2016); 14. V международная конференция «Новые достижения в области материаловедения и экологии» NAME'S (Nancy, 2016).

Помимо перечисленных выше конференций результаты исследований докладывались на: Пермском городском гидродинамическом семинаре имени проф. Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова (Пермь, 2021, заседание № 1551) (рук. Любимова), семинаре ИМЭХ УФИЦ РАН (Уфа, 2021), научно-образовательном семинаре ПГГПУ (Пермь, 2021).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 работ [1-19]. Из них 9 — статьи в рецензируемых журналах, 8 из них в журналах, рекомендованных ВАК [1-8] и индексируемых в базах данных Scopus и WoS, одна статья в журнале, индексируемом в базе РИНЦ [9], 10 — материалы и тезисы докладов [10-19].

**Личный вклад автора.** Для исследований по неакустическим вибрациям автор проводил обзор литературы, самостоятельно разрабатывал и тестировал лабораторные установки, экспериментальные методики и проводил эксперименты, а также разрабатывал программы численных расчетов и проводил вычисления. Постановка задач, обсуждение и анализ результатов осуществлялись совместно с научным руководителем диссертационной работы. Для экспериментов по акустическим вибрациям ультразвуковой частоты разработка экспериментальной установки, проведение экспериментов и последующая обработка экспериментальных данных проводились совместно с соавторами публикаций. При изучении влияния УЗ воздействия на флотацию калийных руд автор участвовал в подготовке проб и проведении экспериментов. Постановка задач, обсуждение и анализ результатов осуществлялись совместно с научным руководителем диссертационной работы Т.П. Любимовой и другими соавторами публикаций.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации – 109 страниц текста с рисунками и таблицами. Список литературы содержит 193 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна исследований,

описана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлены результаты экспериментального исследования поведения двухфазной системы при наличии горизонтальных неакустических вибраций линейной поляризации. Эксперименты проводились для систем, состоящих из водных растворов глицерина разной концентрации и стальных шариков радиусом  $r_0 = 2,25$  мм и плотностью материала  $\rho_0 = 7,8$  г/см<sup>3</sup>. Количество шариков составляло  $N = 150$ . Амплитуда вибраций варьировалась в диапазоне  $a = 0,5 \div 4,8$  мм, частота вибраций в интервале  $\omega = 30 \div 190$  с<sup>-1</sup>. Шарики помещались в заполненную жидкостью герметичную кювету в форме параллелепипеда с оргстеклянными стенками. Кювета имела размеры  $110 \times 200 \times 15$  мм<sup>3</sup> и прикреплялась к столу вибратора строго горизонтально. Над кюветой закреплялась цифровая камера, позволяющая следить за поведением двухфазной системы. Схема экспериментальной установки представлена на Рис.1.

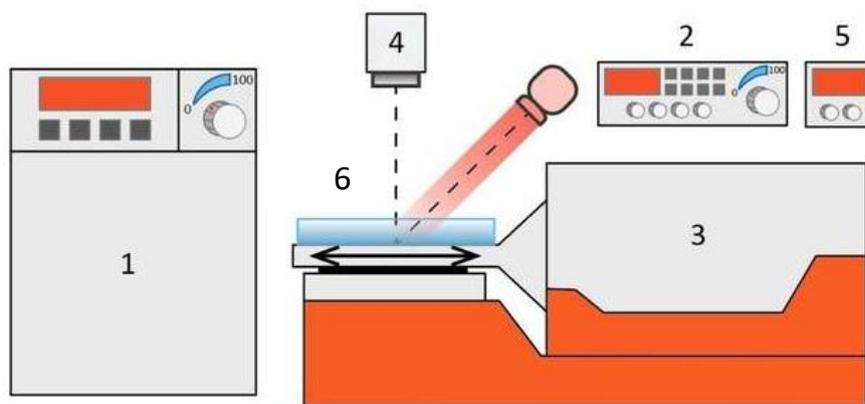


Рис.1 Схема экспериментальной установки: а) 1 – усилитель УМК-2000, 2 – генератор сигналов специальной формы GFG-8219A, 3 – электродинамический вибратор V650, 4 – цифровая камера Nikon D3500, 5 – портативный виброметр ВВМ-311, 6 – экспериментальная кювета

Найдено, что на первой достаточно короткой стадии действие вибраций приводило к формированию кластеров, состоящих из нескольких шариков. Дальнейшая эволюция системы заключалась в формировании линейных цепочек, ориентированных перпендикулярно направлению вибраций. При увеличении частоты и амплитуды вибраций, наблюдалось разделение фаз: шарики собирались у одной из стенок кюветы, при этом граница раздела чистая жидкость – металлические шарики в жидкости ориентировалась перпендикулярно направлению вибраций. Наблюдаемое в экспериментах квазиравновесное состояние, соответствующее разделению фаз, аналогично квазиравновесному состоянию двухслойной системы газ-жидкость в

прямоугольном сосуде, подверженном высокочастотным горизонтальным вибрациям называемое «ориентирующим эффектом вибраций»<sup>1</sup>.

Таким образом в зависимости от параметров вибраций, возможны 3 различных режима поведения системы. При малых амплитудах и частотах вибраций частицы случайно распределены по объему (режим 1). При амплитудах вибраций в диапазоне  $a_{min} \div a_{max}$  и частотах в диапазоне  $\omega_{min} \div \omega_{max}$  в жидкости формируются устойчивые периодические структуры, представляющие собой цепочки из шариков, ориентированные перпендикулярно оси вибраций (режим 2). При больших амплитудах и частотах вибраций все шарики собираются у одной из стенок кюветы, при этом граница раздела чистая жидкость – водоглицериновый раствор с плотно упакованными шариками, ориентируется перпендикулярно направлению вибраций (режим 3). Карта режимов на плоскости параметров частота вибраций – амплитуда вибраций и экспериментальные фотографии различных режимов приведены на Рис.2 а, б.

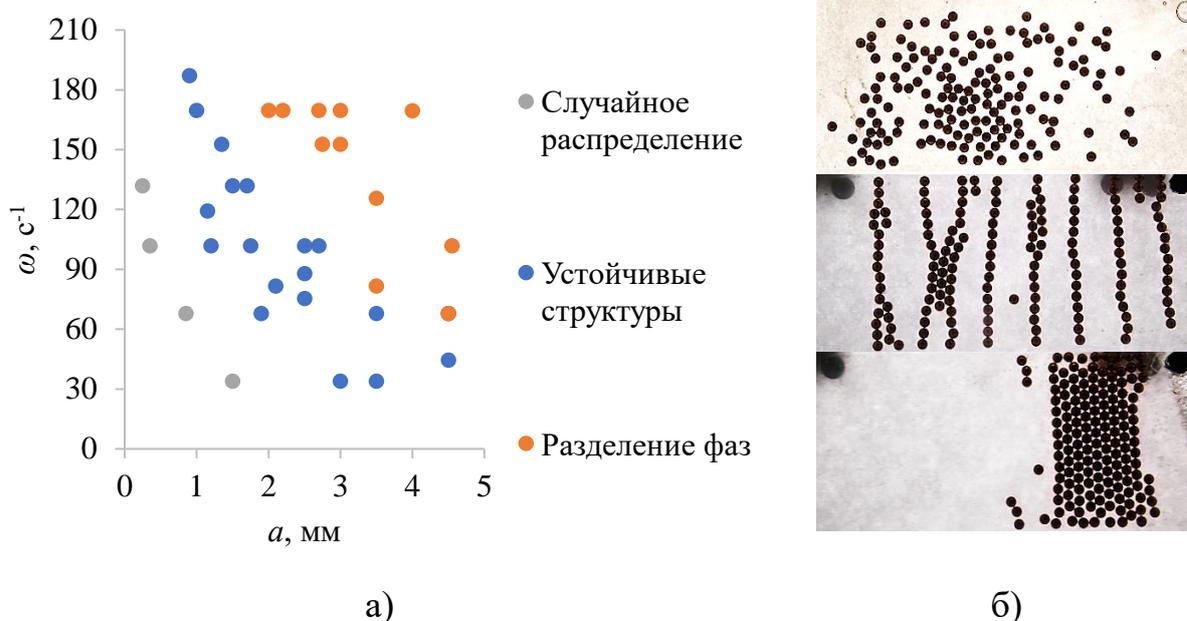


Рис.2 а) Карта режимов на плоскости параметров амплитуда вибраций – частота вибраций, б) экспериментальные фотографии различных режимов

На Рис.3 а, б приведены карты режимов на плоскостях частота вибраций – амплитуда скорости вибраций, амплитуда вибраций – амплитуда скорости вибраций соответственно. Как видно из этих рисунков, области существования режимов 1, 2, 3 по амплитуде скорости вибраций близки к горизонтальным слоям, т.е. определяющим параметром, ответственным за существование различных режимов, является амплитуда скорости вибраций.

<sup>1</sup> Lyubimov D. V., Cherepanov A. A., Lyubimova T. P., Roux B. Vibration influence on the dynamics of a two-phase system in weightlessness conditions // Le Journal de Physique IV. – 2001. – Т. 11. – №. PR6. – С.83-90.

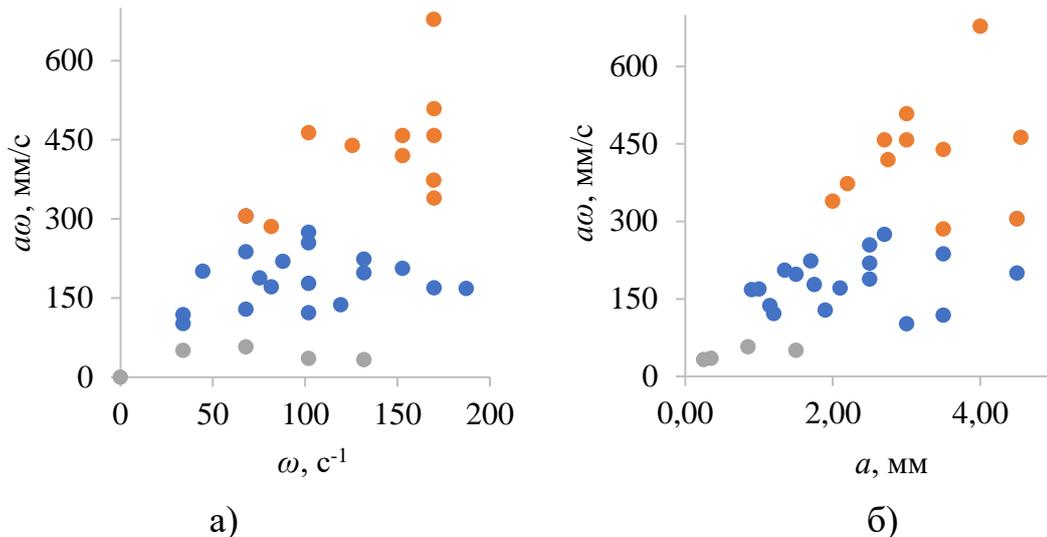


Рис.3 Карты режимов на плоскостях: а) частота вибраций – амплитуда скорости вибраций, б) амплитуда вибраций – амплитуда скорости вибраций

В первой главе представлены также результаты исследования зависимости пространственного периода структур от параметров вибраций и вязкости жидкости. В этих экспериментах кинематическая вязкость жидкости варьировалась в диапазоне от 1,9 до 29,6 сСт. Ранее, исследователями был сделан вывод о том, что пространственный период структур пропорционален толщине вязкого слоя Стокса <sup>2</sup>  $\delta = (2\nu / \omega)^{1/2}$ . Проведенные при разных амплитудах и частотах вибраций и вязкостях жидкостей эксперименты показали, что пространственный период структур пропорционален  $a$ ,  $\omega^{-1/2}$  и  $\nu^{1/2}$ . На Рис.4 приведена зависимость безразмерного пространственного периода структур  $\delta_R = \delta / r_0$  от безразмерной толщины вязкого слоя Стокса  $\lambda_R = \lambda / r_0$ . Как видно полученные в экспериментах точки хорошо ложатся на единую прямую  $\lambda_R = C\delta_R$ , где  $C$  – константа. Результаты регрессионного анализа показали, что  $C \approx 45$ . Таким образом, эксперименты подтвердили гипотезу о пропорциональности пространственного периода структур толщине вязкого слоя Стокса.

В первой главе также численно методом молекулярной динамики исследовано поведение ансамбля твердых сферических частиц в колеблющейся вязкой жидкости. Для двумерного случая показано формирование равноотстоящих линейных цепочек, ориентированных перпендикулярно направлению вибраций. В рамках трехмерного подхода численно исследовано поведение ансамбля твердых сферических частиц в колеблющейся вязкой жидкости в полостях, имеющих форму параллелепипеда. Обнаружено формирование квазистационарных

<sup>2</sup> Lyubimova T., Lyubimov D., Shardin M. The interaction of rigid cylinders in a low Reynolds number pulsational flow // Microgravity Science and Technology. – 2011. – Т. 23. – №. 3. – С. 305-309.

периодических структур, имеющих вид равноотстоящих плоских слоев частиц, ортогональных направлению вибраций (Рис.5).

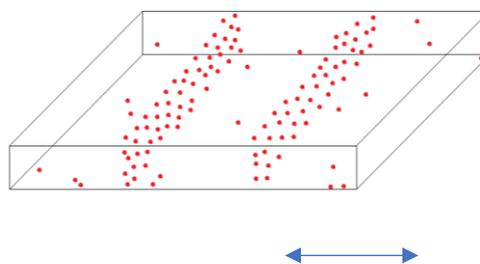
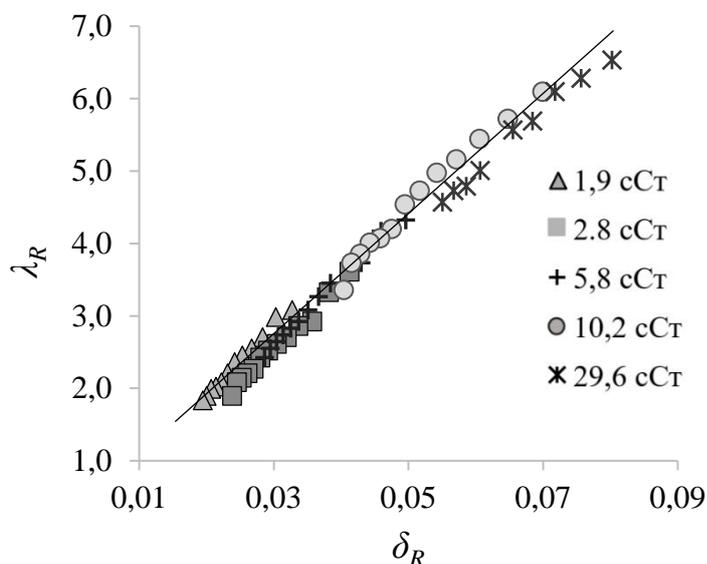


Рис.4 Зависимость безразмерного пространственного периода структур от безразмерной толщины вязкого слоя Стокса (символы – эксперимент, прямая линия – аппроксимационная прямая)

Рис.5 Полученное в трехмерных численных расчетах квазистационарное распределение частиц по объему

**Вторая и третья главы** диссертации посвящены исследованию влияния акустических вибраций ультразвуковой частоты на поведение многофазных сред. Актуальность этого исследования связана с применением УЗ воздействия на процесс флотации. Флотационная пульпа представляет из себя многофазную систему, состоящую из твердых частиц руды, жидкости (как правило воды), газовых пузырьков и реагентов (ПАВ и др.), из которой извлекается одна из компонент руды за счет процесса закрепления пузырьков на гидрофобизированных частицах руды и их всплытия. Во второй главе исследуется поведение такой системы при УЗ воздействии, а в третьей главе изучаются возможности интенсификации процесса флотации с помощью УЗ.

**Вторая глава** состоит из двух разделов, в первом из которых изучается поведение пузырьков в объеме жидкости, во втором - поведение пузырьков вблизи помещенных в жидкость твердых пластин. В экспериментах использовалась кювета, имеющая форму параллелепипеда, с внешними размерами  $110 \times 116 \times 160 \text{ мм}^3$ . Кювета была изготовлена из оргстекла толщиной 3 мм. В качестве источника ультразвука использовался пьезокерамический излучатель, прикрепленный к металлическому диску из нержавеющей стали диаметром 88 мм, размещенный на дне кюветы внутри её так, чтобы центр излучателя совпадал с центром дна ячейки. Он подключался к генератору УЗ вибраций с частотой  $f = 28 \text{ кГц}$  или  $40 \text{ кГц}$  и максимальной мощностью

$P = 60$  Вт. С помощью высокоскоростных камер в объеме жидкости и в плоскости лазерного ножа, регистрировались пузырьки, формирующиеся в результате УЗ воздействия на жидкость. На основе этих данных, методами машинного зрения, вычислялась относительная площадь, засвеченная пузырьками в плоскости лазерного ножа. В качестве жидкостей использовались дистиллированная вода и водные растворы химически чистых солей NaCl и KCl и ПАВ (SDS).

Эксперименты по исследованию поведения пузырьков в объеме для водных растворов ПАВ показали, что относительная площадь, засвеченная пузырьками, уменьшается с увеличением концентрации ПАВ, что аналогично зависимости дзета-потенциала пузырьков от концентрации ПАВ<sup>3,4</sup> Найдено, что диаметр пузырьков, возникающих при наличии УЗ воздействия уменьшается с увеличением концентрации солей NaCl и KCl в результате ингибирования коалесценции (Рис.6). Обнаружено, что ультразвуковое воздействие может приводить к значительному повышению критической концентрации коалесценции (ККК) для водных растворов соли NaCl по сравнению со случаем отсутствия УЗ воздействия<sup>5,6</sup>. Показано, что существуют различия в эволюции популяции пузырьков в чистой воде и растворах солей и ПАВ. В случае чистой воды, относительная площадь, засвеченная пузырьками,  $S/S^*$  резко нарастает после включения УЗ на протяжении 12 секунд, а затем медленно спадает. В случае растворов солей и ПАВ участки резкого роста и медленного спадания величины  $S/S^*$  отсутствовали, величина  $S/S^*$  оставалась неизменной на протяжении всего эксперимента, что связано с процессом ингибирования коалесценции.

В экспериментах по изучению поведения пузырьков вблизи твердых пластин, погруженных в жидкость, обнаружено, что под действием ультразвука около гидрофильной поверхности кварца образуются пузырьки, большая часть которых всплывает при выключении УЗ.

В случае гидрофобной поверхности тефлона пузырьки остаются прикрепленными к поверхности на всех этапах эксперимента, образуя агломераты (Рис.7). Скорость роста пузырьковой популяции на гидрофобной поверхности тефлона с краевым углом смачивания  $99^\circ$  более чем на два порядка выше, чем на поверхности акрила с краевым углом смачивания  $78^\circ$ .

---

<sup>3</sup> Najafi A. S. et al. A novel method of measuring electrophoretic mobility of gas bubbles // Journal of colloid and interface science. – 2007. – Т. 308. – №. 2. – С. 344-350.

<sup>4</sup> Ushikubo F. Y. et al. Zeta-potential of Micro-and/or Nano-bubbles in Water Produced by Some Kinds of Gases // IFAC Proceedings Volumes. – 2010. – Т. 43. – №. 26.

<sup>5</sup> Quinn J. J. et al. Critical coalescence concentration of inorganic salt solutions // Minerals Engineering. – 2014. – Т. 58. – С.1-6.

<sup>6</sup> Firouzi M., Nguyen A. V. Critical salt concentration in bubble coalescence inhibition: effect of dissolved gases and hydrophobic attraction // Drainage and Stability of Foam Films during Bubble Coalescence in Aqueous Salt Solutions. – 2014. – С.105.

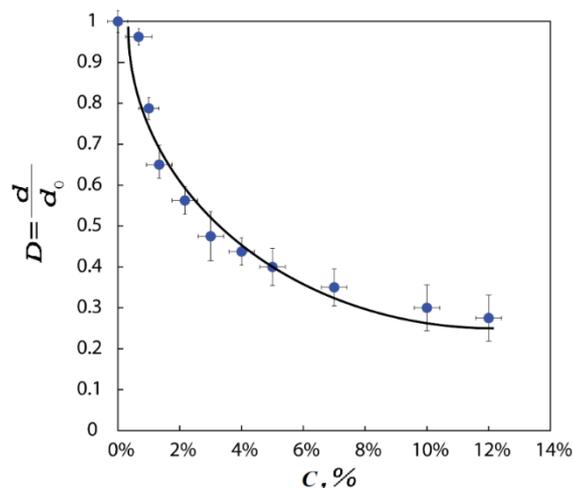


Рис.6 Зависимость нормированного диаметра пузырька от массовой концентрации солей NaCl и KCl,  $P = 100$  Вт,  $f = 40$  кГц

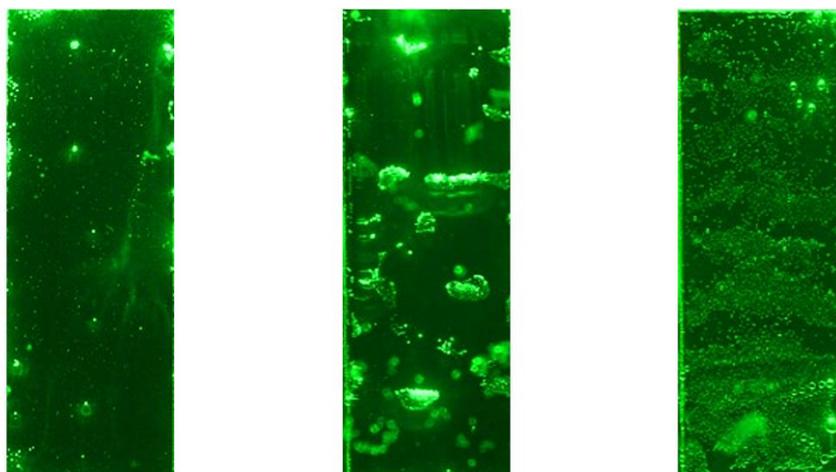


Рис.7 Фотографии поверхностей твердых пластин в дистиллированной воде после  $t = 800$  с воздействия ультразвука: а) - кварц, б) - акриловое стекло, в) – тефлон

Найдено, что на скорость роста относительной площади, занимаемой пузырьками, существенно влияет концентрация газа в воде (Рис. 8 б). В отсутствие предварительной дегазации площадь поверхности, покрытая пузырьками, быстро растет до насыщения. В частично дегазированной воде зависимость от времени относительной площади, занимаемой пузырьками на поверхности акрила, близка к линейной. В случае длительной дегазации воды пузырьки не закрепляются на поверхностях акрилового стекла и кварца, тогда как на поверхности тефлона они остаются прикрепленными на всех этапах эксперимента.

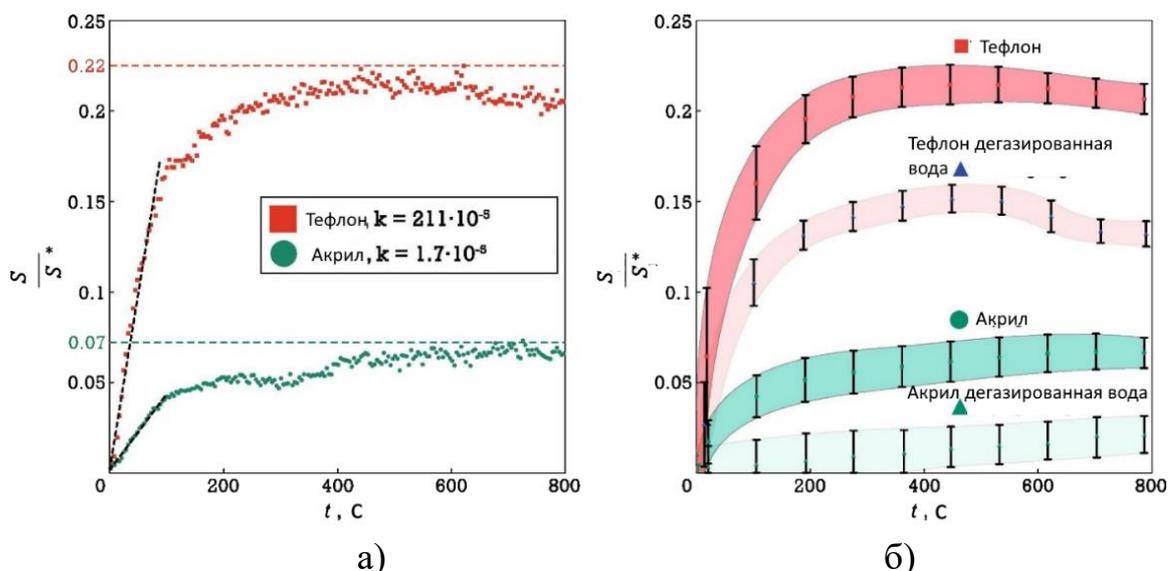


Рис.7 Зависимости относительной площади поверхности, покрытой пузырьками от времени УЗ воздействия в дистиллированной воде (нормальной газированной и частично дегазированной) для пластин из тефлона и акрила

В третьей главе представлены результаты исследования процесса флотации калийной руды при УЗ воздействии. При одинаковой дозировке ПАВ извлечение KCl и NaCl в отсутствие ультразвуковой обработки зависит от крупности руды (Рис.8). При уменьшении размера частиц от 0,5 - 1 до 0,25 - 0,5 извлечение KCl в пенный продукт увеличивается с 82% до 97%, что по-видимому связано с низкой вероятностью отрыва частиц от пузырьков по сравнению с крупной фракцией, что увеличивает общую вероятность фиксации частиц на пузырьках.

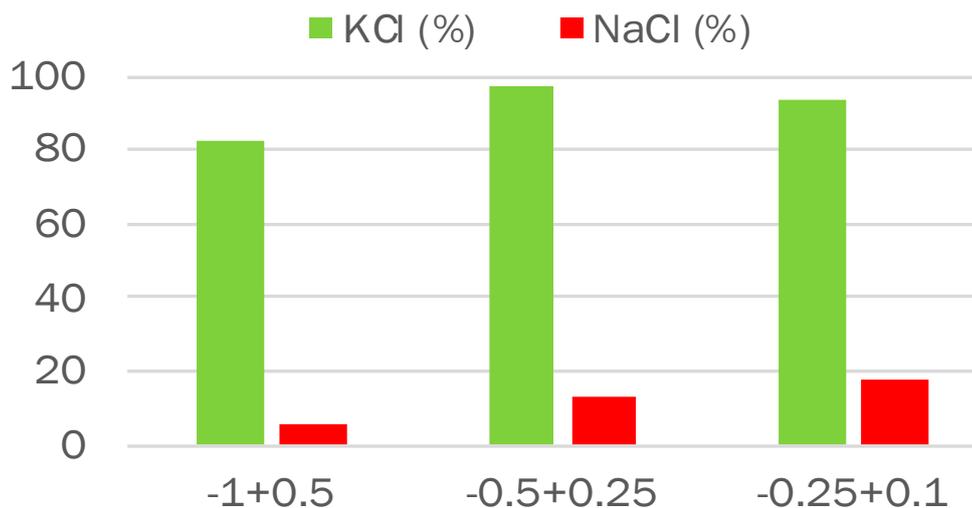


Рис.8 Извлечение KCl и NaCl для фракций разного размера

Результаты экспериментов по флотации калийной руды при УЗ обработке показали максимальную эффективность для мелкозернистых фракций (0,1 – 0,25 мм). Извлечение KCl не зависело от режима,

продолжительности и мощности ультразвуковой обработки и оставалось на уровне  $94 \div 97\%$  (Рис.9). При этом извлечение NaCl снизилось с 17,91% (в отсутствие ультразвука) до 9,91% при комбинированном режиме ультразвукового воздействия (во время перемешивания с реагентами и флотации) мощностью  $P = 45\%$ . При той же самой мощности, в случае воздействия ультразвука только во время флотации не оказало существенного влияния на извлечение NaCl в пенный продукт, которое осталось на уровне 15,2%, аналогично извлечению в отсутствие ультразвуковой обработки (16,47%).

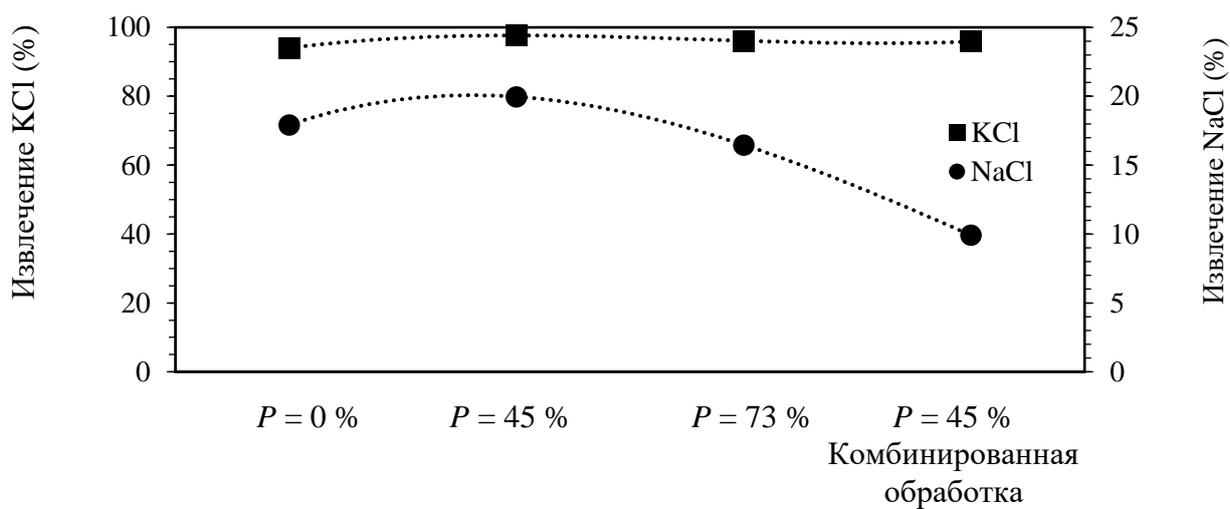


Рис.9 Сравнение двух методов ультразвуковой обработки минеральной суспензии для флотации солей KCl и NaCl: (0,1 – 0,25 мм; расход NORAM SH: 100 г / т)

Обнаружено, что ультразвук оказывает значительное влияние на флотацию крупных частиц за счет усиления отрыва частиц от пузырьков. Обработка ультразвуком высокой интенсивности приводит к значительному увеличению селективности средней (0,5 – 0,25 мм) и мелкой (0,25 – 0,1 мм) фракций с соответствующим снижением извлечения сильвина из-за уменьшения поверхностной гидрофобизации и усиленному отрыву частиц от пузырьков. При мощности обработки ультразвуком до  $P = 45\%$ , извлечение сильвина из фракции среднего размера остается неизменным и высоким (90 – 92%), в то время как извлечение NaCl снижается. На флотацию KCl из мелкозернистой фракции (0,25 – 0,1 мм) обработка ультразвуком не влияет, в то время как извлечение галита значительно снижается, что позволяет переработать фракцию такой крупности, которая, по традиционной схеме переработки калийной руды, сбрасывается в хвосты. Полученные экспериментальные данные, могут помочь инженерам отрасли оптимизировать параметры обработки ультразвуком, когда требуется повышение селективности между сильвином и галитом. Уменьшение

содержания NaCl в концентрате при обработке ультразвуком может разблокировать руду с низким содержанием или уменьшить потери сильвина с фракциями шлама.

**В Заключении** приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Экспериментально исследовано поведение двухфазной системы металлические шарики - водные растворы глицерина под действием поступательных линейно поляризованных вибраций. Впервые обнаружено существование трех режимов системы: 1) случайное распределение частиц по объёму; 2) существование устойчивых пространственно-периодических структур, ориентированных перпендикулярно направлению вибраций; 3) разделение фаз с границей раздела чистая жидкость – упаковка частиц, с границей перпендикулярной к направлению вибраций. Построена карта режимов. Показано, что определяющим параметром, ответственным за существование различных режимов является амплитуда скорости вибраций.

2. Впервые определены зависимости пространственного периода квазистационарных структур от частоты и амплитуды вибраций и вязкости жидкости. Подтверждена гипотеза о том, что пространственный период образующихся структур пропорционален толщине вязкого слоя Стокса.

3. Численно исследована динамика ансамбля твердых сферических частицы в колеблющейся вязкой жидкости. В случае двумерной задачи обнаружено формирование равноотстоящих линейных цепочек, ориентированных перпендикулярно направлению вибраций.

4. Впервые численно исследовано поведение ансамбля твердых сферических частицы в колеблющейся вязкой жидкости в рамках трехмерного подхода. Обнаружено формирование равноотстоящих плоских слоев частиц, ортогональных направлению вибраций.

5. Экспериментально, оптическими методами исследовано поведение пузырьков в воде, водных растворах солей и ПАВ, включая динамику пузырьков вблизи твердых границ при наличии УЗ воздействия. Найдено, что зависимость относительной площади, засвеченной пузырьками от концентрации ПАВ аналогична зависимости дзета-потенциала пузырьков от концентрации ПАВ.

6. Определено, что диаметр пузырьков, возникающих в УЗ поле, уменьшается с увеличением концентрации солей NaCl и KCl и ПАВ в результате ингибирования коалесценции. Обнаружено, что УЗ-воздействие приводит к повышению критической концентрации коалесценции (ККК) для водных растворов NaCl более чем в три раза.

7. В дистиллированной воде под действием ультразвука у гидрофильной поверхности кварца образуются пузырьки, большая часть которых

поднимается при выключении УЗ. На гидрофобной поверхности пузырьки остаются прикрепленными к ней на всех этапах эксперимента, образуя кластеры.

8. Скорость роста пузырьковой популяции на гидрофобной поверхности тефлона, более чем на два порядка выше по сравнению менее гидрофобной поверхностью акрила.

9. Экспериментально исследована возможность интенсификации флотационного разделения калийной руды с использованием УЗ обработки. Показано, что эффективность флотации зависит от размера частиц, мощности ультразвука и продолжительности воздействия. Обработка ультразвуком приводит к значительному увеличению селективности средней мелкой фракций руды из-за уменьшения поверхностной гидрофобизации и усиленного отрыва частиц галита от пузырьков.

### **Список публикаций**

1. **Filippov L. O., Filippova I. V., Barres O., Lyubimova T. P., Fattalov O. O. Intensification of the flotation separation of potash ore using ultrasound treatment // Minerals Engineering. – 2021. – Т. 171. – С. 107092. (Q1)**
2. **Lyubimova T., Rybkin K., Fattalov O., Kuchinskiy M., Filippov L. Experimental study of temporal dynamics of cavitation bubbles selectively attached to the solid surfaces of different hydrophobicity under the action of ultrasound // Ultrasonics. – 2021. – Т. 117. – С. 106516. (Q1)**
3. **Fattalov O., Lyubimova T., Rybkin K., Kuchinskiy M. Experimental Study of the Processes of Formation, Drift and Levitation of Vapor–Gas Bubbles in Water Containing Surfactant Under the Action of Ultrasound // Microgravity Science and Technology. – 2021. – Т. 33. – №. 2. – С. 1-7. (Q1)**
4. **Fattalov O., Lyubimova T., Rybkin K., Kozlov M., Kuchinskiy M. Experimental Study of the Processes of Formation, Drift and Coalescence of Vapor-Gas Bubbles in Aqueous Solutions of Salts and Surfactants in a Sonochemical Reactor // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1945. – №. 1. – С. 012004.**
5. **Lyubimova T. P., Rybkin K. A., Fattalov O. O., Kuchinskiy M. O., Kozlov M. V., & Kugaevskaya A. A. On the mechanism of selective fixation of bubbles under the action of ultrasound in NaCl and KCl solutions during degassing // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1809. – №. 1. – С. 012029.**
6. **Lyubimova T. P., Rybkin K. A., Fattalov O. O., Filippov L. O. Dynamics of Vapor-Gas Bubbles in a Liquid Near Solid Surfaces with Different Properties // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 581. – №. 1. – С. 012041.**

7. **Rybkin K. A., Bratukhin Y. K., Lyubimova T. P., Fattalov O., Filippov L. O. Experimental study of formation and dynamics of cavitation bubbles and acoustic flows in NaCl, KCl water solutions // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 879. – №. 1. – С. 012026.**
8. **Lyubimova T. P., Maslova Y. M., Fattalov O. O. Dynamics of an ensemble of spherical particles under translational vibrations of linear polarisation // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 879. – №. 1. – С. 012025**
9. Любимов Д. В., Любимова Т. П., Торсунова Е. С., Фатталов О. О. Динамика частиц в жидкости под действием вибраций // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2012. – №. 4. – С. 122-125.
10. Рыбкин К. А., Фатталов О. О., Любимова Т. П., Кугаевская А. А. Экспериментальное исследование динамики парогазовых пузырьков в жидких средах под действием ультразвука // Теория, эксперимент и новые технологии. – 2020. – с. 166.
11. Кугаевская А. А., Любимова Т. П., Рыбкин К. А., Фатталов О. О., Козлов М. В. Экспериментальное исследование возникновения парогазовых пузырьков в воде и растворах солей, под действием ультразвука // Пермские гидродинамические научные чтения. – 2020. – С. 253-256.
12. Любимова Т. П., Фатталов О. О. Динамика двухфазных систем под действием горизонтальных вибраций линейной поляризации // Многофазные системы. – 2020. – Т. 15. – №. 1-2. – С. 60-60.
13. Козлов М. В., Любимова Т. П., Рыбкин К. А., Фатталов О. О., Кугаевская А. А. О механизме селективного закрепления пузырьков под действием ультразвука в растворах NaCl и KCl при дегазации // Пермские гидродинамические научные чтения. – 2020. – С. 238-240.
14. Любимова Т. П., Рыбкин К. А., Фатталов О. О., Филиппов, Л. О. Динамика парогазовых пузырьков в жидкости вблизи твердых поверхностей с различными свойствами // XXI Зимняя школа по механике сплошных сред. – 2019. – С. 183-183.
15. Филиппова И. В., Филиппов Л. О., Любимова Т. П., Фатталов О. О. Интенсификация процесса флотационного разделения калийных солей с применением внешних воздействий // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения-2019). – 2019. – С. 195-198.
16. Любимова Т. П., Рыбкин К. А., Фатталов О. О., Филиппов Л. О. Взаимодействие парогазовых пузырьков в растворах NaCl с твердыми поверхностями различной степени смачиваемости // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – 2019. – С. 1058-1060.
17. Любимова Т. П., Фатталов О. О. Динамика твердых частиц, взвешенных в жидкости, под действием горизонтальных вибраций линейной

- поляризации // Неравновесные процессы в сплошных средах. – 2017. – С. 67-70.
18. Рыбкин К. А., Филипов, Л. О., Любимова Т. П., Фатталов О. О. Экспериментальное исследование формирования и динамики кавитационных пузырьков в водных растворах солей NaCl и KCl под действием ультразвука // Всероссийская конференция молодых ученых-механиков. – 2017. – С. 101-101.
  19. Фатталов О. О., Маслова Ю. М., Любимова Т. П. Динамика ансамбля сферических частиц под действием поступательных вибраций линейной поляризации // Математическое моделирование в естественных науках. – 2016. – Т. 1. – С. 392-396.

*Научное издание*

Фатталов Оскар Олегович

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук на тему:  
Экспериментальное исследование динамики  
твердых и газовых включений в жидкости  
в вибрационном и акустическом полях

Подписано в печать \_\_\_\_\_ 2022. Формат 60 × 90 1/16. Тираж 100 экз. Заказ.